

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

資料探勘技術在 HCPV 系統上之應用
The Applications of Data Mining Technology on HCPV Systems

計畫編號：1002001INER045

受委託機關(構)：萬能科技大學

計畫主持人：李國路

聯絡電話：0911185978

E-mail address：glee@mail.vnu.edu.tw

核研所聯絡人員：林宏儒

報告日期：100 年 11 月 30 日

目錄

中文摘要.....	1
ABSTRACT	2
作者及所屬單位.....	3
壹、計畫緣起與目的	4
一、緣起.....	4
二、目的.....	5
貳、研究方法與過程	7
一、收集資料.....	7
二、理論分析及計算機模擬.....	7
(一)有關運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素之 研究：.....	7
(二)有關太陽光發電(PV)模組輸出入模式應用於HCPV的合適 性分析之研究：.....	20
(三)有關太陽光發電系統的失效模式與效應分析：.....	23
(四)有關FMEA與維修工作規劃之部分：.....	28
參、主要發現與結論	30
一、運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素之研究.....	30
(一)演算法與模擬結果.....	30
(二)結論.....	49
二、太陽光發電(PV)模組輸出入模式應用於HCPV的合適性分 析之研究.....	50
(一)太陽光發電(PV)模組輸出入模式.....	50
(二)高聚光太陽光發電(HCPV)的輸出入模式.....	53

(三)比較分析	55
(四)結論	58
三、太陽光發電系統的失效模式與效應分析之研究	59
(一)傳統 FMEA 的失效風險評價方法	59
(二)改善失效風險的評價方法一-模糊理論	62
(三)改善失效風險的評價方法二-灰色關聯分析	66
(四)HCPV 系統的失效模式與效應分析	69
四、太陽光發電系統關鍵維修工作規劃之研究	74
(一)完成關鍵失效模式與效應分析暨推薦維修行動	74
(二)完成維修工作規劃的查察機制與失效排除流程圖	74
(三)調整維修或維護工作規劃	77
五、太陽光發電系統技術發展資料收集之彙整	79
(一)說明	79
(二)學到的經驗	80
六、程式撰寫	81
七、論文發表準備與投寄(含 SCI 期刊乙篇)	82
(一)工作報告	82
(二)研討會論文	82
(三)期刊論文	82
肆、參考文獻.....	83
一、有關計畫緣起與目的參考資料：	83
二、有關研究方法與過程的參考資料：	83
三、有關主要發現與結論的參考資料：	85
伍、附件：投稿論文.....	90

中文摘要

本計畫「資料探勘技術在 HCPV 系統上之應用」(The Applications of Data Mining Technology on HCPV Systems)，計畫編號 1002001INER045，由萬能科技大學接受委託研究。計畫的背景是在 HCPV 的發展中，不論是系統的供給者或使用者，均須對影響系統效能的因素、系統的輸入輸出轉換模式、失效的模式與影響、及維修工作的規劃等方面深入了解，以保證其在建置運轉後，能夠維持系統高效能的操作與可用度。故本計畫的工作重點在運用資料探勘(Data Mining)技術，從大量且看似隨機的資料中，挖掘出影響系統效能的關鍵因素、及探討 PV 的五參數模式與 HCPV 的關聯特性，另一工作重點為透過故障資訊(或維修資料)的搜集，運用失效模式與效應分析(FMEA)技術，探討異常發生之模式與原因，據以執行關鍵維修的規劃工作，使營運符合經濟成本效益。

本計畫完成(一)運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素之研究、(二)太陽光發電(PV)模組的輸出入模式在 HCPV 上應用性之探討、(三)運用失效模式與效應分析(FMEA)技術，對 HCPV 異常發生的模式與原因之探討、(四)對關鍵維修工作規劃實務之探討、(五)對太陽光發電系統技術發展資料之蒐集、(六)報告及論文投稿，SCI 期刊論文一篇及其他論文一篇。本計畫成果希望可以提供模組設計及系統設計與營運的參考。

關鍵詞：聚光太陽光發電系統、資料探勘、失效模式與效應分析、
五參數模式

Abstract

This project “The Applications of Data Mining Technology on HCPV Systems”, Project No. 1002001INER045, is conducted by Vanung University. The focus of this project intends to dig out critical factors that affect system performance from the large and seemingly random data by using data mining techniques. In addition, this project also investigates the relationship between the five-parameter model of PV and HCPV. Another focus of this project is to explore the modes and causes of exception by the use of failure mode and effects analysis (FMEA) techniques. The results will be treated as a base to execute planning of the key maintenance. It is expected that the outcome can offer as a reference for system design, module design and operation.

Tasks have been accomplished in this project include: (1) To explore the key factors affecting system performance of research by using data mining principles, (2) To study the application of Photovoltaic (PV) modules in the HCPV input-output model, (3) To identify the major breakdowns of HCPV by using failure mode and effects analysis (FMEA) technique, (4) To discuss the practices of planning of key maintenance work, (5) To collect the relevant latest technical development materials of the HCPV system, (6) To fulfill the final report of the project with two papers, including one submitted SCI journal paper. The research results in this project could be good module design and operation references for HCPV system.

Key words: HCPV System, Data Mining, FMEA, Five-parameter Model

作者及所屬單位

計畫主持人：李國路副教授萬能科技大學管理與資訊系

共同主持人：林宏志副教授萬能科技大學電子工程系

共同主持人：王金印副教授萬能科技大學資訊管理系

壹、計畫緣起與目的

一、緣起

我國「再生能源發展條例」歷經多年催生，終於 2009 年 6 月正式通過，也開創了再生能源的市場與發展共識。依據前國科會副主委紀國鐘教授的分析[1]，認為以台灣的產業型態來看，再生能源當中，最具產業效益的當屬太陽能。因為台灣的半導體和面板都可以跨入這個領域。至於 LED 也因為同樣 III-V 族材料技術，更能順利跨入高效率聚光型太陽能發電系統 (HCPV) 領域。他並認同發展 HCPV 對台灣具有(1)減少台灣電子或其它工業產品出口時碳關稅衝擊的問題、(2) 1 座 100MWp 的 HCPV 電廠大概 1.5 年就可蓋好，而且馬上可以供電、(3)兼具國家安全的考量(因為蓋 HCPV 電廠的設計、研發、生產、製造台灣都會)等 3 大好處。故政府如果順勢能蓋 HCPV 發電廠，不但擴大內需，對產業也有帶動效果，更能夠增進就業。

另一方面，國際半導體設備材料產業協會台灣 (SEMI Taiwan) 已在 2009 年成立「HCPV 發展推動小組」[2]，這是國內 HCPV 業者首次整合，也是台灣太陽光電業者繼催生再生能源法之後，再次動員，為促進產業發展而發聲，共近 20 家產官學研專家共同投入，主要是希望進一步協助國內 HCPV 業者加強產業垂直整合及國際行銷能力，加速推動台灣 HCPV 系統和產業的發展，其資料顯示，2020 年 HCPV 每度發電成本可降至新台幣 3 元以下，可與傳統石化能源相抗衡。依據國內在 HCPV 居領導地位的核研所報導[3]，我國約有 22 家公司已分別投入 III-V 族太陽電池、聚光模組、太陽追蹤器及 HCPV 系統等一項或多項產業領域，依據產業領域區分，約有 8 家投入 III-V 族太

陽電池產業、8 家投入聚光模組(含組件)產業、8 家投入太陽光追蹤器產業及 6 家投入 HCPV 系統整合產業。在整個 HCPV 產業鏈的構成中，核能研究所亦是銜接上游學術界與下游產業界的樞紐地位，對 HCPV 的發展著力甚深，貢獻良多。

HCPV 因具有節省電池原料、降低發電成本和維持高發電效率的優點，非常適合用於太陽能發電場之設置，已成為全球太陽能建廠的新選擇，在台灣太陽能產業中也勢必成為發展重點[4, 5]。然而 HCPV 若以產業的角度視之，它是一項具有高轉換效率，但也同時具高複雜度與成本的產品。若進一步以使用者的角度視之，重點必在於如何保證其在建置運轉後，能夠維持系統高效能的操作與可用度。故不論是系統的供給者或使用者，均須對影響系統效能的因素、系統的輸入輸出轉換模式、失效的模式與影響、及維修工作的規劃等方面深入了解，以有所因應。故本計畫的工作重點擬運用資料探勘技術，使用監控中心提供的資料，探討影響系統效能的關鍵因素及探討 PV 的五參數模式與 HCPV 的關聯特性，希望研究成果可以提供模組設計及系統設計與營運的參考，另一工作重點為透過故障資訊(或維修資料)的搜集與分析，運用失效模式與效應分析(FMEA)技術，探討異常發生之模式與原因，據以執行關鍵維修的規劃工作，使營運符合經濟成本效益。

二、目的

台灣雖然已具備先進的 HCPV 技術、模組和完整的產業鏈，以及諸如自己擁有人才與專利等領先的優勢[1, 6]，然而在這太陽光電產業旭升的同時，許多議題卻不得不重視，例如在現今太陽光發電產業尚屬成長期的時候，對於影響 HCPV 系統

效能的因素之瞭解與掌握為何？對於 HCPV 系統輸出入模式的建立，以及輸出入參數在 HCPV 系統上之可能影響性為何？實務上應如何考量系統建置後之操作及維護問題，以使得系統的發電效能最適化？等等問題都是現階段如何讓 HCPV 產業拓展市場、進入成熟期的關鍵。因此，本研究團隊擬以高聚光太陽光發電系統在操作上的效能影響因素及維護上的關鍵工作實務規劃上進行研究，並以太陽光發電系統的技術發展為主軸，彙整國內外相關文獻及案例，希望藉以了解各先進國家與機構在高聚光太陽光發電系統操作與維修策略上的作為，提供委託研究單位在 HCPV 系統效能整合上之建議，並在技術發展與系統運作、監控、維護的精進上能有所貢獻。

為配合核能研究所進行高聚光太陽光發電系統之技術發展與系統整合暨監控技術之精進，本研究的目的依序彙整如下：

(一)運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素，以提供系統設計及營運參考。。

(二)探討太陽光發電(PV)模組的輸出入模式在 HCPV 上之應用性，以提供系統設計參考。

(三)運用失效模式與效應分析(FMEA)技術，探討異常發生之模式與原因，以提昇系統之使用率。

(四)探討關鍵維修工作規劃實務，以提供系統營運參考。

貳、研究方法與過程

本計畫之研究方法，主要區分為收集資料與理論分析及計算機模擬兩部分：

一、收集資料

以案例彙集為重點，搜尋國內、外相關書籍、期刊，涵蓋太陽光發電系統技術發展、太陽光發電系統輸出入模式、太陽光發電系統輸出入量測報告及有關資料探勘原理與資料分析技術等資料之收集；包含：決策樹、模糊理論、圖型識別演算法、類神經網路、失效模式與效應分析(FMEA) 之技術、與維修工作規劃等。

二、理論分析及計算機模擬

(一)有關運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素之研究：

資料探勘 (Data Mining) 是一種專門的程序，可在大量存放的資料中，找出先前並不知道，但最後可有效理解的資訊，並可利用這些找出的資訊建立一個預測或分類的模型，或識別不同資料庫之相似性，產生的資訊可協助決策者進行更週延的決策。資料探勘有許多不同的定義，例如是從資料庫中提取有用資訊的科學，或是從資料中提取出隱含之過去未知的有價值的潛在資訊，所以被稱為資料樣型分析 (Data Pattern Analysis) 或功能相依分析 (Functional Dependency Analysis)、或是資料考古學(Data Archaeology)等。資料探勘的策略方法包括監督式學習、非監督式分組與購物籃分析 (Market Basket Analysis) 等。監督式學習包括：分類 (Classification)、推估 (Estimation)、預測 (Prediction) 詳

如圖 2.1 的關聯圖。這裡的非監督式分組是在訓練時，其訓練資料的類別無法事先知道或是未知，所以僅能依照資料相似的值組(Tuple)進行群組分類。不同於非監督式分組，監督式學習則有提供訓練資料，可從訓練資料學習哪個值組屬於哪個類別。這裡的值組是指資料的 n-維屬性值，每個值組屬於某個類別，而類別是由類別屬性所決定。在訓練過程中，可從原始資料中挑選出訓練值組而構成訓練值組集(Training Tuples)。為了避免訓練模型發生過適(Overfit)的現象，必須隨機由原始資料抽出來成為測試值組集(Testing Tuples)，它們與訓練值組集是獨立的，也就是說它們不會用於訓練過程。購物籃分析主要的分析對象是發生在同一時間的事件。其主要的資料來源是零售業，藉由分析銷售的資料，找出哪些商品會一起被消費者購買的規則等。

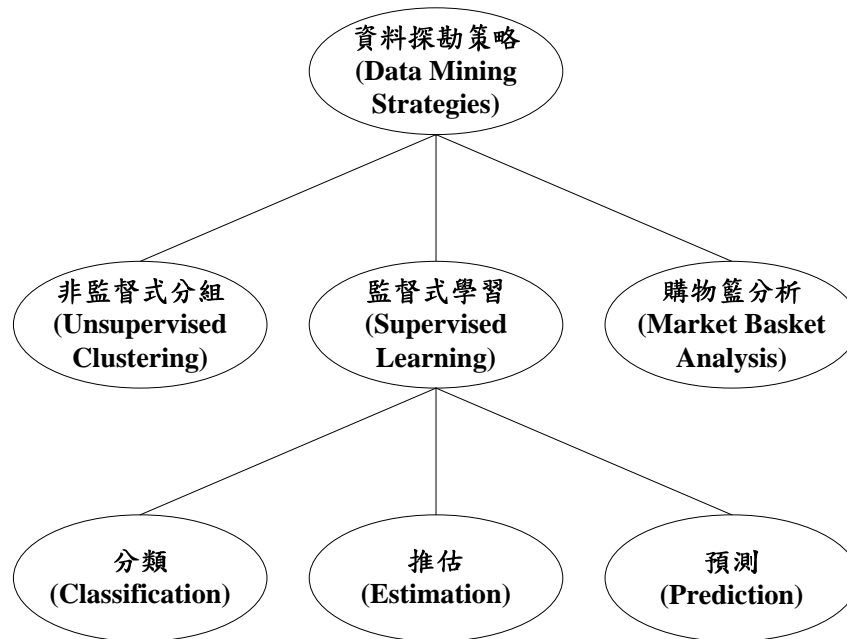


圖 2.1 資料探勘的策略關聯圖

近年來，資料探勘的理論方法與實務應用等被廣泛的討論，國內外相關的研究成果也不斷地被發表出來，主要是因為面臨處理資料庫中大量資料的挑戰等問題，對於這些問題，它的主要方法是資料統計分析和人工智慧搜尋技術。在傳統上，大多數資料探勘面臨的對象是變數繁多而且筆數有很龐大的資料，其常用的技術以統計分析為代表，包括機率論、敘述統計、迴歸分析、類別資料分析等，進一步的有變因分析 (Factor Analysis)、區隔分析(Discriminated Analysis)和群集分析(Cluster Analysis)等。現今的技術則有決策樹 (Decision Tree)、貝氏決策準則(Bayesian Decision Rule)、貝式信賴網路 (Bayesian Belief Network)、類神經網路 (Neural Network)、圖形識別演算法(Pattern Recognition Algorithms)、基因演算法 (Genetic Algorithms)、規則推論法 (Rules Induction)、模糊理論(Fuzzy Theory)等，這些方法有不同的適應對象，依據問題不同的特性而採用不同的方法，才能得到較佳的結果。典型的應用包括決策樹、模糊理論、圖形識別演算法和類神經網路等。

資料探勘的工具是利用資料以建立一些模擬真實世界的模式 (Model)，利用這些模式描述資料中的特徵及關係。可區分為五種模式，分別是：

- (1)分群 (Clustering) 是將資料分組，其目的是找出各組之間的差異及同組中成員的相似性，使群內差異小，群外差異大。例如從 HCPV 的資料紀錄中，根據特徵因子如日照、溫度、最大電壓(Vmax)、最大電能 (Pmax)等關鍵因子，分群為常態(Regular condition)和

遮蔽狀況(Shading condition)。

(2)分類 (Classification) 是根據一些變數的數值做計算，再依照結果作分類。從歷史性已分類的資料中部份取樣，經由實際的運作測試，研究資料分類的特徵及規則，然後再根據這些特徵建立模式，對其他未經分類或是新的資料做預測。

(3)趨勢分析 (Trend Analysis) 是用現有的數值來預測未來的數值，其所分析的數值與時間皆有相關，一般用於預測與事件改變的比對。例如從 HCPV 的資料紀錄中，根據特徵因子如風載資料(wind load data)中的風速、風向和最大風速等資料，來推估預測其發展的趨勢。

(4)關聯 (Association) 是是要在同一個交易中找出隱含其它項目之存在的項目。

(5)循序特徵 (Sequence Pattern) 是與關聯關係很密切，所不同的是序列特徵中相關的項目 (Item) 是以時間來區分，找出某段時間內的可預期行為特徵。

資料探勘不是一種新技術，而是結合多項專業技術的研究，它包括(1)機器學習(Machine Learning Approaches)，此類似統計方法一樣，機器學習方法尋求一個最佳模式來符合測試資料 (Testing Data)。不同之處在於大多數機器學習方法利用資料自動化學習過程，自動歸納出分類規則及建立模組。資料探勘最常使用的機器學習方法包括決策樹歸納 (Decision Tree Induction) 及概念式分群 (Conceptual Clustering)。(2)統計方法(Statistical Approaches)包括 Bayesian 網路、迴歸分

析、相關分析及分群分析 (Cluster Analysis)，通常統計模式是經由訓練資料集 (Training Data Sets) 來建立，然後從模式中尋求規則及特徵。(3) 資料庫導向方法 (Database-oriented Approaches) 著重在處理現有的資料，是一種屬性導向歸納 (Attribute-oriented Induction)，反覆從大量的資料中找出共同的規則及模式。(4) 資料視覺探索 (Data Visual Exploration) 將多維度的資料轉換成視覺化物件，如點、線及區域，讓使用者可以動態檢視及探索有興趣的部分，進而分析出資料的模式。(5) 其他方法如類神經網路 (Neural Network) 運用於資料的分類及預測，約略集合 (Rough Set) 運用於分類及分群。模糊分群方法等。這些技術可以互相整合來處理複雜的問題及提供替代方案，如統計方法可以結合視覺探索技術，用以輔助系統處理資料模式及趨勢分析。茲將決策樹、模糊理論、圖形識別演算法和類神經網路等典型的應用說明如下：

1. 決策樹

決策樹是一種用來表示分類規則的遞迴結構，它使用由上而下和各個擊破的策略，將特定的物件集合隨著樹的成長，逐步地分割成更小的子集合，以此類推。圖 2.2 為決策樹解決互斥的問題 (Exclusive-or Problem)。

If $x=0$ and $y=0$ then class = a
If $x=1$ and $y=1$ then class = a
If $x=0$ and $y=1$ then class = b
If $x=1$ and $y=0$ then class = b

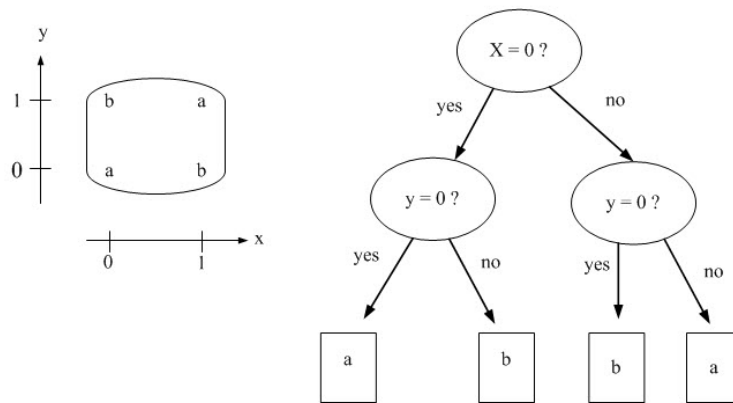


圖 2.2 決策樹解決互斥的問題(Exclusive-or Problem)

2. 模糊理論

模糊理論的基本概念是運用了模糊邏輯 (Fuzzy Logic, FL)，它是以法則為推理基礎的一種人工智慧，但可容忍不確定性的資料，可使用近似值或主觀值來進行推論。其基礎是一套模糊集合論，它是在 1965 年由美國加州柏克萊大學 Zadeh 教授首先於 Information and Control 學術期刊發表[1]，日後廣泛地被應用於一些語意不明與不確定性的資料處理。模糊理論不是用某一個明確的數值來衡量事件資料，而是使用「隸屬函數」(Membership Function) 來量化、描述該事件與某個模糊概念的關係。圖 2.3 為模糊歸屬函數與應用範例：風速的模糊數。

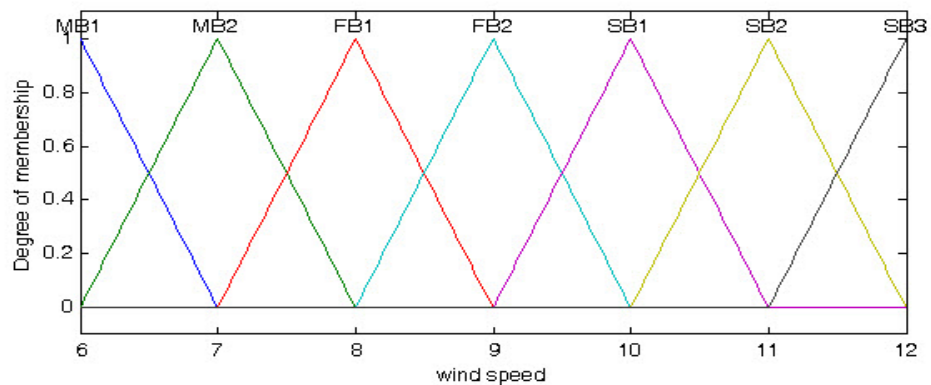


圖 2.3 模糊歸屬函數及風速的模糊數。

隸屬函數的種類大致上分成五種，包含：三角形 (Triangular Shape)、梯形 (Trapezoidal Shape)、S 函數(S Function)、Z 函數(Z Function)、及 Π 函數 (PI Function) 等。其中隸屬函數值設定介於 0 到 1 之間，用來描述各個元素屬於某個集合的程度，若隸屬於某個概念的程度越大，則其隸屬函數值越接近 1；反之，隸屬函數值則越接近 0。其特點是更接近人類的判斷思考，取代了傳統的精確邏輯 (Crisp Logic)，避免了以點來切割所產生的問題，而能用於處理不確定因素的系統。

其後更近一步的發展至模糊層級分析法 (Fuzzy Analytic Hierarchy Process, FAHP)，其起因是對一個問題需要做決策時，經常會發現它是由一些複雜因素所組合，包含有形的及無形的因素，這些因素之間彼此相互影響。層級分析法發展的目就是將一個複雜的問題，切割成不同的層級，降低複雜度與關聯度，提供決策者作出較佳的決策方案。層級分析法是加州大學 Thomas L. Saaty 教授在 1971 年協助美國國防部從事應變計畫研究時所提出的，主要用於不確定情況及具有多個評估準則的決策問題上。其後逐漸成為一項解決各種決策問題的方法，其應用範圍極為廣泛。但是在人類主觀及情感世界裡存在許多不確定性的因素，加入模糊法則可補足了傳統層級分析法中具有資訊不足、不明確和模糊性的決策行為，使其更能反應現實世界中的情況。在傳統的層級分析法中，其成對比較法之比值皆為明確的數值，以利建立成對比較矩陣，但會有主觀、不精確、模糊等問題產生，所以 Buckley[2] 提出的作法是以

梯型模糊數(Trapezoidal Fuzzy Number)來表示成對準則相互比較的重要程度，而形成模糊正倒值矩陣。其模糊尺度，採取 $\{1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1, 3, 5, 7, 9\}$ 等九個數。Cheng and Mon [3, 4]則提出利用模糊數的區間代數運算及分割原理，進行模糊可靠度的分析。1974 年 E. H. Mamdani 教授在蒸汽機自動運轉控制上成功地驗證了模糊邏輯控制器的優越性能，此後便造成一股研究風潮，現今已經用在相當廣泛的領域，例如在模糊控制系統(Fuzzy Control System)、模糊分類(Fuzzy Clustering)、圖形識別(Pattern Recognition)、決策分析(Decision Analysis)等方面上。尤其在控制系統上，近年來有相當多的學者在這方面投注心力 [5]。

模糊理論也常常與其他演算方法結合使用，例如模糊理論與類神經網路的結合，模糊理論與基因演算法的結合應用，模糊理論與螞蟻演算法的整合等。模糊理論也被用於太陽光電系統上，主要都是集中在處理最大功率追蹤技術(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的問題上[6-11]。

3. 圖型識別演算法

圖型識別演算法具有歸納與分析推斷的能力，為多種辨識技術的主要基礎，例如電腦視覺、語音辨識、生物辨識等方法，所以被大量應用在資料處理、機械視覺、圖案識別等的領域上[12-13]，主要可以分為兩大類：監督式分類法(Supervised Classification)，在已知的類別中做歸類，例如判別分析(Discriminant Analysis)等。另一為非監督式分類(Unsupervised Classification)，從未知分類中來學習分

類，這是一種學習式的分類法，例如聚類法 (Clustering)，將輸入的相似圖型編在同一類別[14]。傳統的研究重點是利用類神經網路辨識特定的圖型，探討其變化量的資訊，如變動量的大小、週期的長短等。近年來有許多的方法被提出，其中的支援向量機在預測和分類問題皆有不錯的表現，且廣泛的運用在不同領域，例如影像辨識、手寫辨識、文字分類與生物科技等相關分類問題上。最近幾年，圖型識別在模式識別中引起廣泛的重視與興趣的是臉部的辨識，在此領域中，有許多不同的臉部辨識應用，例如：罪犯資料比對、身份辨識、門禁控制、資訊加密和監視系統，相關的研究論文大為增加[15-17]。由於臉部表情廣泛程度的變化，高效能的臉部辨識系統需要有精緻複雜的演算法，才能處理單一類群內有廣泛臉部表情變化的模式。在辨識系統的設計上，主要有四個方法：樣版比對法(Pattern Matching)、統計分類法(Statistical Classification)、句法分析(Syntactic Analysis)和類神經網路(Neural Network)。(1)樣版比對法是利用輸入的圖形來作相關聯度的分析，雖然簡單，但是相當消耗資源。如先行處理，可提高辨識率。(2)在統計分類法中，每個圖型具有多個特徵的屬性。每種類別可利用數據來作訓練，以找出可分類的決策邊界。(3)句法分析是因為圖形本身很複雜，必須拆解成簡單的圖元來表示，這種方法常應用在語言學上，如句法、文法的分析。(4)類神經網路：利用大量的類神經元(Neuron)來作運算，具有高度平行化處理的能力和學習與記憶的功能，以改變神經網路各處理單元之間的權重，來學習和記憶輸入與輸出

資料之間的關係，對於非線性的分類有極佳的容錯能力。

4.類神經網路

類神經網路是一種模擬自然界生物腦部受到外界刺激、學習的過程，經由不斷學習與修正錯誤，進而適應環境的法則。生物神經元(Neurons)接收訊號的部位稱之為神經節，從四面八方傳送過來的訊息必須透過神經結點彙整後才能送至神經核而每條神經節傳送到神經核的訊號強弱不一（所以神經節被視為儲存資訊的部位），訊號都送達神經核後做某種化學轉換後，再將新的訊號傳送出去，如此一個神經元接著一個神經元，而構成神經網路。類神經網路為一種非線性模型，主要功能可分為兩大類：分類與預測，獨特的資料平行輸入運算特性使得類神經網路有相當的容錯能力。通常是由層狀的大量人工神經元所組成各種網路模式，而人工神經元是簡單模擬生物神經元的功能，它自外界或其他人工神經元取得訊息，並加以簡單的運算，輸出訊息給其他人工神經元或外在環境，每一個處理單元（神經元）的輸出透過加權值(Weights)的連接，可成為其他許多處理單元的輸入。由於神經結可視為神經網路儲存資料的地方，因此神經網路的學習即在調整神經節的強度，也就是調整神經網路的加權值，藉此達到想要的目標[22]。

經考量本計畫關於太陽能輸出的資料特性，將以類神經網路演算法來學習和判斷關鍵因素為主，再以決策樹演算法為輔。圖 2.4 為倒傳遞類神經網路(Backpropagation neural network)，此網路含有一個輸入層，二個隱藏層和一

個輸出層，而神經元的個數將視萃取資料的維度和複雜度而定，文獻上也無一定的判別方法，如果在訓練的過程中無法收斂，除了調整參數外，也嘗試調整神經元的數目，避免過度學習或不足學習。圖 2.4 的輸入樣本 $U_p = \{U_1, \dots, U_i, \dots, U_j, \dots, U_N\}$ ，而輸出為 $O_p = \{O_1, \dots, O_i, \dots, O_j, \dots, O_N\}$ ，每一層的 W 為權重，經過不斷的訓練學習，此權重也跟隨著改變更新，最終目的是輸出值與預設目標的誤差達到最小而完成收斂。

以下為倒傳遞類神經網路演算法的學習流程，假設有 N 個輸入線，在第一個隱藏層有 H 個神經元，在第二個隱藏層有 J 個神經元，在輸出層有 K 個神經元。此學習過程可分為輸出層面和權重更新層面：

(1) 輸出層面：假設在第 k 個神經元的輸出層如(2.1)式所示：

$$O_k = f(S_k) = \frac{2}{1 + \exp\{-S_k\}} - 1, \quad k=1, 2, \dots, K \quad (2.1)$$

其中 $f(S_k)$ 為雙彎曲函數(Sigmoid Function)，而

$$S_k = \sum_{j=0}^J W_{kj} O_j \quad (2.2)$$

(2) 權重更新層面：假設 ε_k 表示第 k 個神經元之輸出值與預設目標值的誤差， $\varepsilon_k = d_k - o_k$ ，則根據 Generalized Delta Rule 輸出權重更新如(2.3)，

$$\Delta W_{kj}(n+1) = \eta \delta_k O_j + \alpha \Delta W_{kj}(n), \quad k=1, 2, \dots, K \text{ and } j=0, 1, \dots, J \quad (2.3)$$

這裡的 η 是學習率 (Learning rate)， α 是慣性因子 (Momentum Parameter)，而 $\delta_k = \varepsilon_k f'(S_k)$ ，

其中 $f'(S_k)$ 是 $f(S_k)$ 對 S_k 的導函數。第二層隱藏層如(2.4)式，第一層隱藏層以此類推。

$$\Delta W_{jh}(n+1) = \eta \delta_j O_h + \alpha \Delta W_{jh}(n), \quad j=1, 2, \dots, J \text{ and } h=0, 1, \dots, H \quad (2.4)$$

$$\delta_j = \left[\sum_{k=1}^K \delta_k W_{kj}(n) \right] f'(S_j)$$

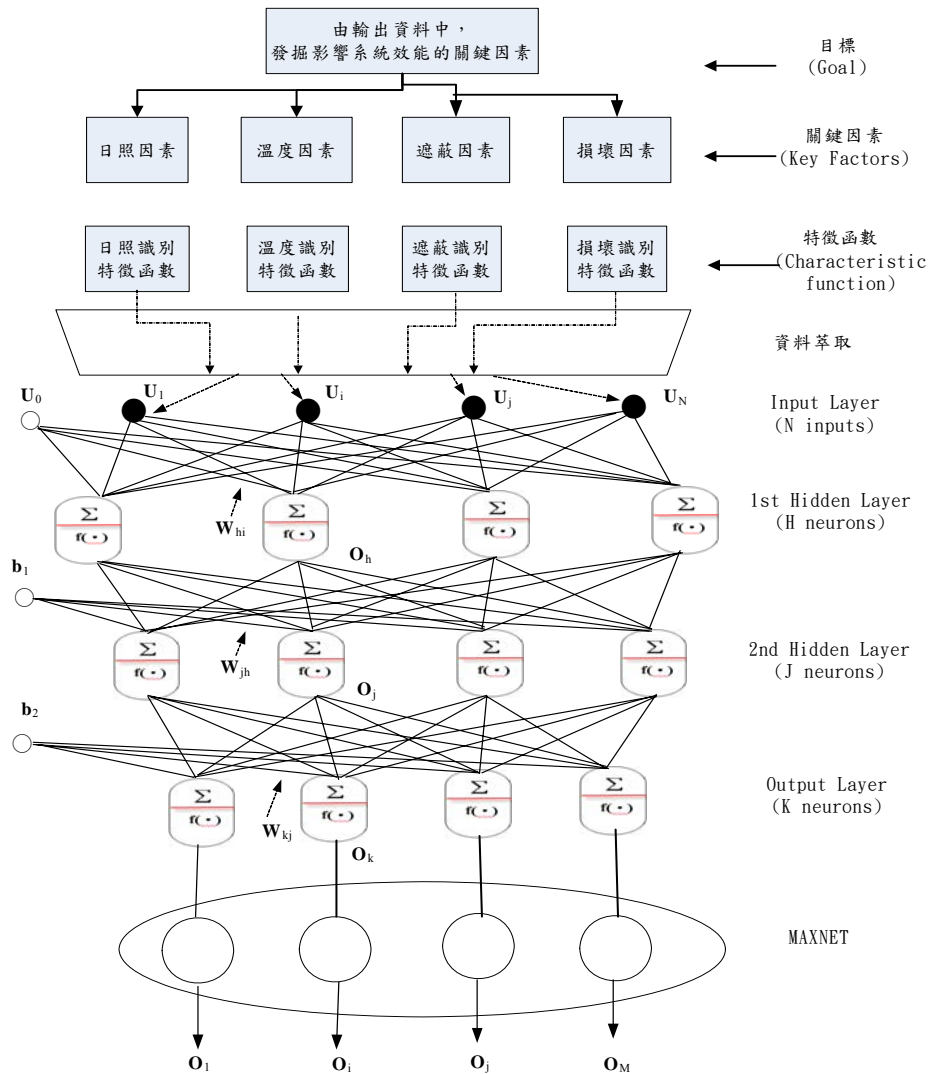


圖 2.4 資料探勘-類神經網路演算法

假設所有的訓練樣本數為 P ，則每次權重更新的量為(2.5)式所示。

$$\Delta W_{uv}(n+1) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \Delta W_{uv}^p(n+1) \quad (2.5)$$

資料探勘所需的資料如日照、溫度、遮蔽、損壞等如圖 2.5 至圖 2.9 所示，將經過萃取特徵點之後，作為類神經網路演算法所需的訓練學習資料。

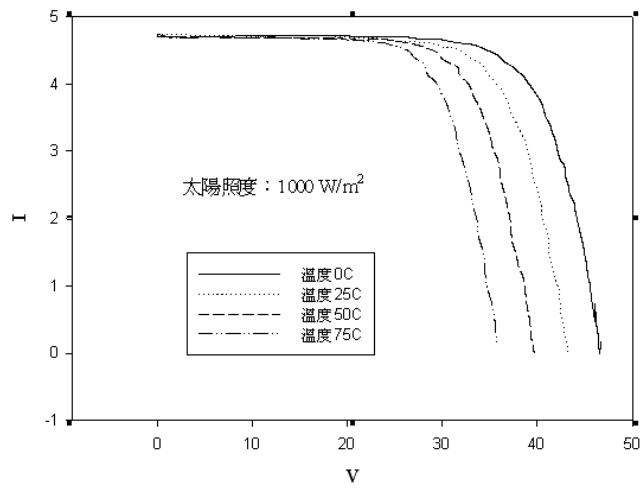


圖 2.5 日照(1000 W/m² ~ 250 W/m²)，溫度：25°C

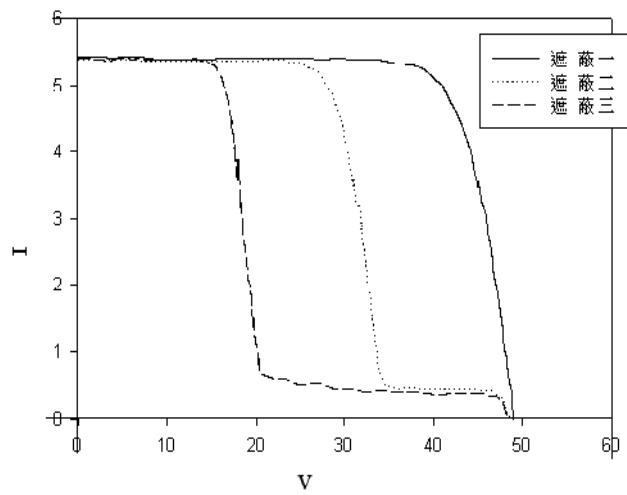


圖 2.6 溫度(0°C ~ 75°C)，日照：1000 W/m²

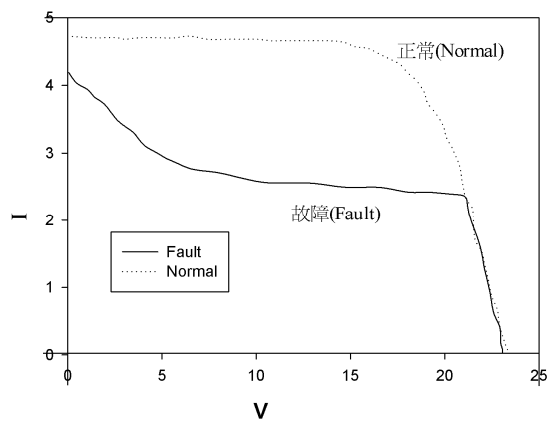


圖 2.7 遮蔽(遮蔽程度一~三) V-I 曲線

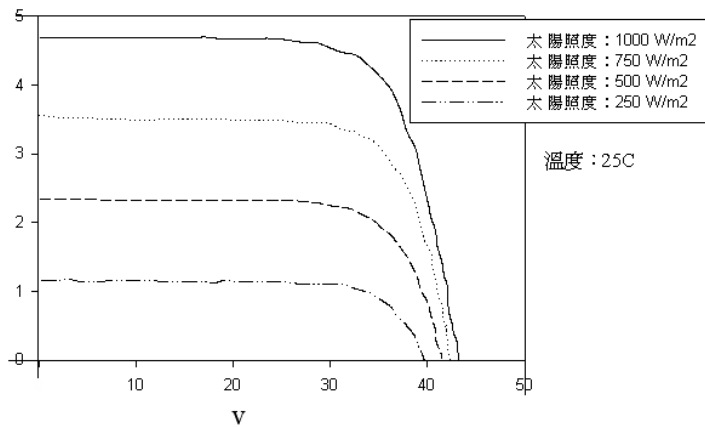


圖 2.8 遮蔽(遮蔽程度一~三) V- W 曲線

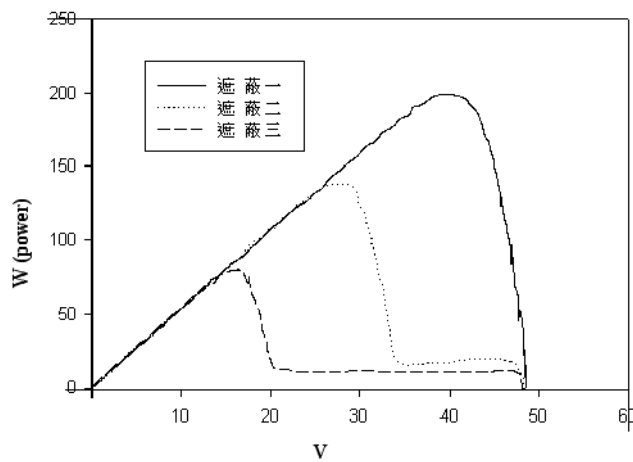


圖 2.9 損壞或故障 V- I 曲線

(二)有關太陽光發電(PV)模組輸出入模式應用於 HCPV 的合適性分析之研究：

建立一個系統的輸出入模式是一種使用理論分析及實驗數據分析來進行解析及綜合的手法，探討當輸入條件變化時，預估輸出的變化，也稱為性能模式(Performance model)。建立模式的步驟是反覆的修正及執行，建立模式的初期所修正的部份可能是模式的架構，後期則常見參數的修正。參考 NREL(National Renewable Energy Laboratory)使用於模擬評估的太陽光發電(PV)模組輸出入模式，主要有三種[18]，

(1)Five-parameter Model (2)King's model (3)Single-point Efficiency Model，摘要如下：

1. Five-parameter Model [19]

模式架構如圖 2.10，模式的五參數為 I_L (Light Ccurrent)、 I_0 (Diode Reverse Saturation Current)、 R_s (Series Resistance)、 R_{sh} (Shunt Resistance)、 a (Modified Ideality Factor)，電流-電壓的特性方程式如下：

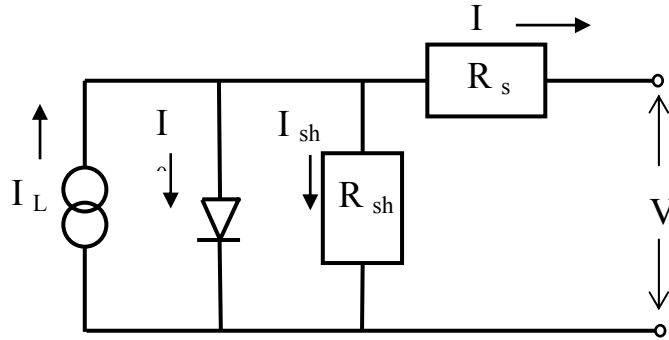


圖 2.10 PV 的五參數模式

$$I = I_L - I_0 - I_{sh} \quad (2.6)$$

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{a}} \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

$$a \equiv \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (2.8)$$

其中， N_s : number of cell in series， n_i : usual ideality factor， T_c : cell temperature， k : Boltzman's constant (1.38×10^{-23})， q : electron charge (1.6×10^{-19})。

一般情形下，五參數是日照及溫度的函數，製作商提供特定條件(標準測試條件)下的數據，如：短路電流、開路

電壓、最大功率時的電流及電壓，短路電流、開路電壓及最大功率的溫度係數。以量測的數據以數值方法，求出參數對溫度及日照變化的關係，建立模式，模式的輸入為日照及溫度，輸出為輸出電壓及電流。

2. King's Model [20]

由 Sandia National Laboratories 所發展，以量測為基礎的模式，特性方程式如下：

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \left[\frac{M}{M_{ref}} \right] [1 + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref})] \left[\frac{G_b K_{\tau\alpha}(\theta) + G_d}{G_{ref}} \right] \quad (2.9)$$

$$I_{mp} = I_{mp,ref} [c_0 E_e + c_1 E_e^2] [1 + \alpha_{I_{mp}} (T_c - T_{c,ref})] \quad (2.10)$$

$$I_x = I_{x,ref} [c_4 E_e + c_5 E_e^2] \left[1 + \left(\frac{\alpha_{I_{sc}} + \alpha_{I_{mp}}}{2} \right) (T_c - T_{c,ref}) \right] \quad (2.11)$$

$$I_{xx} = I_{xx,ref} [c_6 E_e + c_7 E_e^2] [1 + \alpha_{I_{mp}} (T_c - T_{c,ref})] \quad (2.12)$$

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + c_2 N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + c_3 N_s [\delta(T_c) \ln(E_e)]^2 + \beta_{V_{mp}} E_e (T_c - T_{c,ref}) \quad (2.13)$$

$$V_{oc} = V_{oc,ref} + N_s \delta(T_c) \ln(E_e) + \beta_{V_{oc}} E_e (T_c - T_{c,ref}) \quad (2.14)$$

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \quad (2.15)$$

$$E_e = \frac{I_{sc}}{I_{sc,ref} [1 + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{c,ref})]} \quad (2.16)$$

$$\delta(T_c) = \frac{n_D k T_c}{q} \quad (2.17)$$

其中，係數 c0-c7 及 nD，製造商無法提供，必須由其他的實驗加以確定。

3. Single-point Efficiency Model [18]

由 NREL 領導發展應用軟體 Solar Advisor

Model(SAM)，方便使用者計算光發電、性能、成本及財務分析等，並提供相關的圖及表，SAM 是一種高階的套裝軟體，主要用途包含財務計算，對政府獎勵措施的建議，其中，單點的效率模式如下：

$$P_{Module} = \eta_{Module} \cdot A_{Module} \quad (2.18)$$

其中， η_{Module} ：module efficiency， A_{Module} ：module area。

此種模式適用於無其他 PV Module 的資訊，或粗估的數據已足夠時使用。

本項有關太陽光發電(PV)模組輸出入模式應用於 HCPV 的合適性分析之研究，將所收集的資料以關聯比較的方法，比較兩者的等效電路、電流-電壓特性方程式及文獻上或網路上公佈的量測數據等特徵，選擇特徵相近似的 PV 模式，再考量實務上很可能存在雜訊的情形下，引用曲線配適(Curve fitting)的方法加以調整，以利探討 PV 模組輸出入模式應用於 HCPV 應用的合適性。

(三)有關太陽光發電系統的失效模式與效應分析：

失效模式與效應分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)是一種使用表單來進行解析的手法，探討當構成系統之最下層之零件或機器發生故障時，上層之子系統或系統將受到何種影響。藉此手法可以解析出系統的可靠度、維護性、安全性等所受之影響，並且指出可能導致重大故障之零件或機器[21]。指出問題點時，可透過致命度評估，將相對重要的加以量化，找出實施對策之優先順序。FMEA 手法已被廣泛活用在汽車、電力、建築、航太、一般產業、家電資訊，甚

至應用到服務業，最初 FMEA 手法被開發和應用是為了改善產品設計上的可靠性，而現今應用範圍從產品規劃到設計、製造、建築以及使用等階段，涵蓋了整個產品生命週期[22]。

1. FMEA 的基本概念：

失效模式與效應分析 (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) 大約萌芽於 1950 年代初期，當時因各種系統之複雜化，在研製系統上需足以預防失效發生的可能性，因此漸漸發展成安全性與可靠度的設計之解析方法，以期能確保並有效地解決不良問題。其中，美國格魯曼 (Grumman) 飛機公司首先提出 FMEA，應用於飛機操縱系統的失效分析。FMEA 後來並結合關鍵性分析 (Criticality Analysis; CA) 而成為失效模式、效應與關鍵性分析 (Failure Mode Effects and Criticality Analysis, FMECA)，擴大其應用性[23]。

失效模式與效應分析是一種系統方法，使用制式表格及問題解決方法，以早期發現或確認系統或產品潛在之失效模式及其效應，並評估其嚴重度、發生度、難檢度及目前管制方法，從而計算風險優先指數 (Risk Priority Number, RPN)，依序謀求解決之道，以防患失效模式之發生或降低其發生時產生之效應。而風險優先指數可視為一種缺點綜合指標(或總合風險)，其計算方式為[24]：

$$\text{風險優先指數 RPN} = \text{嚴重度(S)} * \text{發生度(O)} * \text{難檢度(D)}$$

其中，嚴重度(S, Severity)指缺點發生對客戶可能產生不良影響的嚴重情況。發生度(O, Occurrence)指失效模式可能發生程度(機率)之預估。難檢度(D, Detection)指估計故障確實發生時之檢出能力。

2. FMEA 的種類

FMEA 的使用時機遍及產品生命週期的每一階段，其種類可概分為[25]：

- (1) 製程(Process)：分析製造與組裝的過程。
- (2) 設計(Design)：分析產品生產前的設計需求與設計方案評估。
- (3) 概念(Concept)：在早期設計概念階段分析系統或次系統。
- (4) 設備(Equipment)：在購買前分析機器與設備設計。
- (5) 服務(Service)：在產品或系統影響顧客前進行分析。
- (6) 系統(System)：對整體系統功能進行分析。
- (7) 軟體(Software)：對軟體功能進行分析。

其中，PFMEA 與 DFMEA 在產品量試或製程驗收前使用較多，對於量產使用與回饋矯正時，則以服務或系統的 FMEA 為重。

3. FMEA 的實施步驟：

FMEA 的實施一般有兩個原則：一是由零件層次往系統層次分析，即由下而上的程序。但當系統軟體功能、硬體項目尚無法確認，或系統相當複雜時，則可從啟始層次

往較低層次(由上而下)分析。對於較複雜的系統則應考慮兩種方法結合應用。二是實施步驟由失效模式分析作起，必須仔細檢查每一項目的因果關係，始可瞭解全盤狀況。對於複雜的產品，必須把產品功能劃分成好幾個分系統，每個分系統再劃分成更細的單元，由每個單元可能造成的失效模式及效應分析，研究採取有效的預防及矯正措施。實施步驟如下[23]，分析流程則如圖 2.11 [26]：

- (1) 定義系統功能
- (2) 決定分析層次
- (3) 繪製功能方塊圖及可靠度方塊圖
- (4) 列舉潛在失效模式(FMEA 製表)
- (5) 研判失效原因與失效影響(FMEA 製表)
- (6) 評估失效風險值
- (7) 研擬預防與改善措施
- (8) 評估改善結果

4. FMEA 的製表範例如表 2.1[27]：

表 2.1 FMEA 的製表範例

項目/ 功能 (要求)	潛在 失效 模式	潛在 失效 效應	嚴重 度	等 級	潛在原因/ 失效機制	發 生 度	現行設計 (製程)管制		偵 測 度	R P N	建 議 措 施	責 任 與 目 標 完 成 日 期	措施結果					
							預 防	檢 測					採 行 措 施	嚴 重 度	難 檢 度	偵 測 度	R P N	

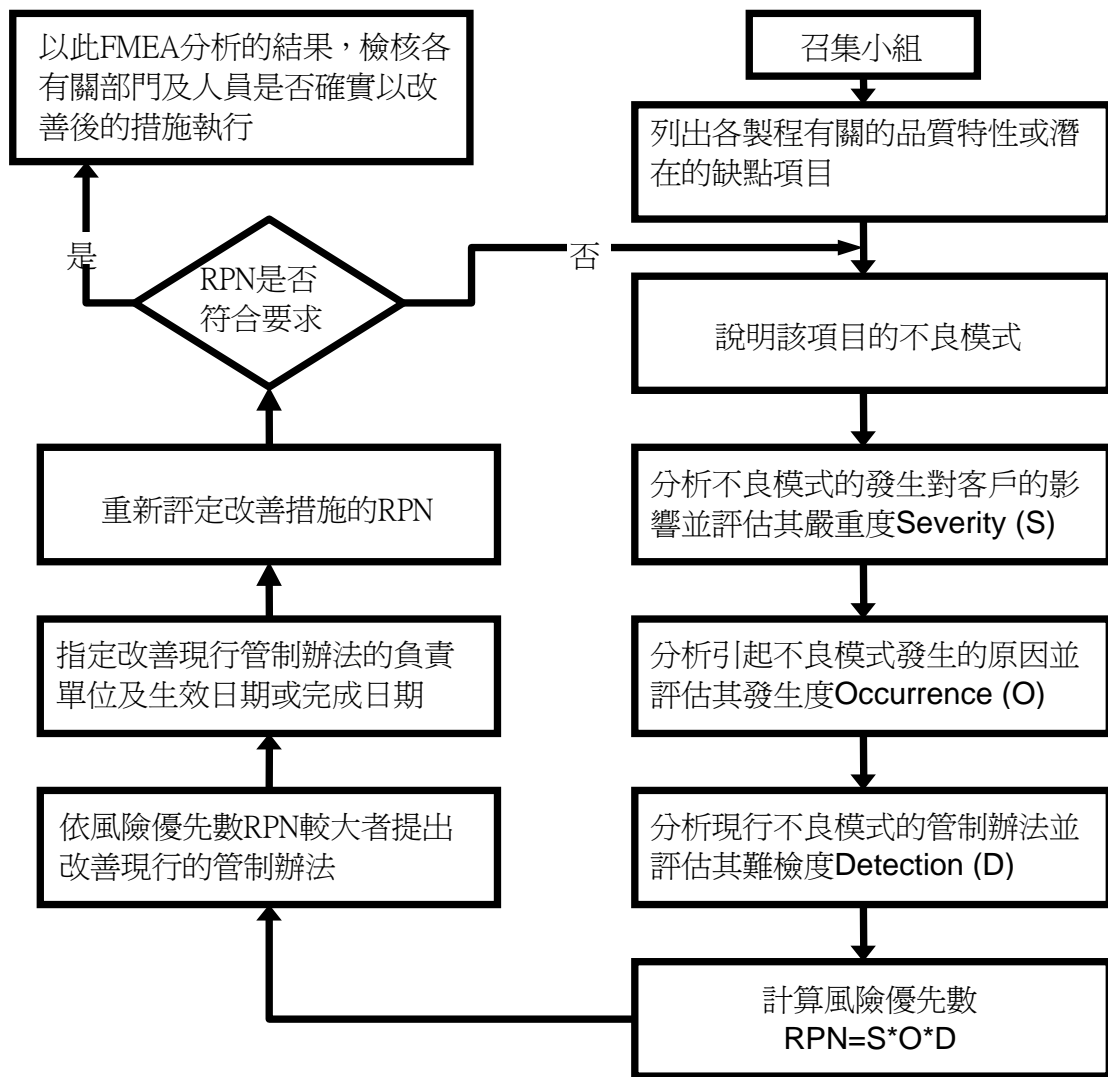


圖 2.11 FMEA 之分析流程圖 [26]

5. 如何運用 FMEA，探討 HCPV：

面對目前 MW 級 HCPV(百萬瓦級的聚光型太陽能發電)系統的建置完成，如何尋求整體發電效能的精進，與操作、維護上的穩定，將是一項重要的任務需求。若以產業的角度視之，聚光型太陽能發電是一項具有高轉換效率，但也同時具高複雜度與成本的產品。若以使用者的角度視之，重點必在於如何保證其在建置運轉後，能夠維持系統高效能的操作與可用度(availability)。這也點出操作上的問題，

是必須站在使用者的立場來考慮的。

為了製造好的產品，必須利用可靠性與安全性的設計手法來減少故障的發生，而為了指出故障要因，可以活用 FMEA 手法。在製造、檢查或建造、安裝已設計好的產品或系統時，也必須使產品或系統的品質良好，FMEA 手法亦可應用於品質改善。此外，在產品使用階段，位維持其機能和性能，必須實施維護保養活動，應用 FMEA 手法也能找出維護作業時的問題點[28]，這也是本節之研究重點。

有關係統使用階段的 FMEA，其目的在於改善運轉操作手冊、診斷材料的退化、防止人為的疏失和類似事故的再度發生，針對 HCPV 系統的使用與維修，將建構適用之 FMEA 表單，找出關鍵性之維修工作，以為後續維修工作規劃實務之目標。

(四) 有關 FMEA 與維修工作規劃之部分：

系統使用中，構成系統之某品目，由於設計之故，喪失部分或全部固有機能，此現象稱為故障，故障狀態稱為故障模式(Mode)。某零件產品故障時，動輒影響到此零件的裝配品、機能品，甚至副系統或系統；因此，使用複雜化系統所發生的故障，最嚴重的情況會造成系統不能達成任務之後果，但輕微的也可能只要更換零件或加以調整即能解決問題，這些都是維修的範疇。然維修的對象無所不在，經濟的作法是找出關鍵項目，再進行維修。這也是實務規劃的經濟手法。

有些人強調 FMEA 只能用在事先，有些則強調 FMEA 可

以是設計的(DFMEA)或製造的(PFMEA)[26]，更有些人則認為 FMEA 可以用在系統生命週期的任何階段中[28]。其實解決設計與製造上的故障固然重要，解決品質管理上的缺陷、或使用上、維護保養上、安全上的缺陷問題同樣也是不可或缺的。其中，設計上的缺陷指的是屬於設計原理之固有性質的缺陷、或設計圖之不完善、錯誤；製造上的缺陷指的是加工法之缺失或裝配錯誤；品質管理上的缺陷指的是工程管理不當、檢驗不詳細或檢驗錯誤；使用上的缺陷指的是操作錯誤或使用和設計條件不同的型態；維護保養上的缺陷指的是維修方法不當或可能引起的二次故障；安全上的缺陷指的是保全作業的錯誤或人工保全不周密[29]。

在維修工作規劃上，運用 FMEA 的目的可概述如下[28]：

1. 對於系統中經常發生故障的設備，應改善其設計、維護保養方法、檢查法等。
2. 防止在維護保養和檢查作業發生人為疏失。
3. 提高維護保養作業中拆卸、安裝作業的可靠性。
4. 評估維護保養之重要度，藉以改善重要作業。
5. 對於待命性質之設備的性能退化，應從對系統的影響來評估重要性，並指出性能退化的重要診斷項目。
6. 評估運轉操作手冊和操作說明書的內容，改善使用者容易出錯或不明究理之處。
7. 指出動力的設備在啟動、停止操作時，潛在的操作失誤。

參、主要發現與結論

一、運用資料探勘原理發掘影響系統效能的關鍵因素之研究

(一)演算法與模擬結果

1. 風載(Wind load) 影響效應演算法

HCPV 具有精密的追日系統，其陣列面板的面積龐大，受到陣風吹襲的影響力甚鉅。為了避免損壞系統的關鍵組件，太陽追蹤器在風速大於臨界點(K 公尺/每秒)時將每座 HCPV 面板平放，被設定停止啟動運轉，但是在風速臨界點時將產生開關動作頻繁的問題。為了解決此問題，減少過度的機械反應，我們應用模糊理論的原理，改變傳統明確集合的絕對屬於之概念而擴充至相對屬於的概念，做出模糊的決策，控制太陽追蹤器啟動的時機，可防止控制馬達在臨界點上啟動與停止來回變動的不正常現象，達到保護其馬達機組的目標。本文應用調適性類神經模糊推論系統(Adaptive Neural Fuzzy Inference System, ANFIS)具有三個輸入變數，分別是風速、風向、和最大風速的變化率，而系統的輸出變數為控制器的啟動區或停止區，亦即輸出如果落入啟動區，則啟動追日系統的馬達，反之，則停止馬達運轉功能且平放著。

一個具有三個輸入變數和一個輸出變數 y 的 ANFIS 架構如圖 3.1 所示，此 ANFIS 共有五層，其輸入變數分別是風速(s)、風的方向(d)和最大風速變化率(m)。輸出變數 y 再與目標值 t 作比較，所產生的誤差往後回饋至 ANFIS 相關各層作為調整參數之依據。

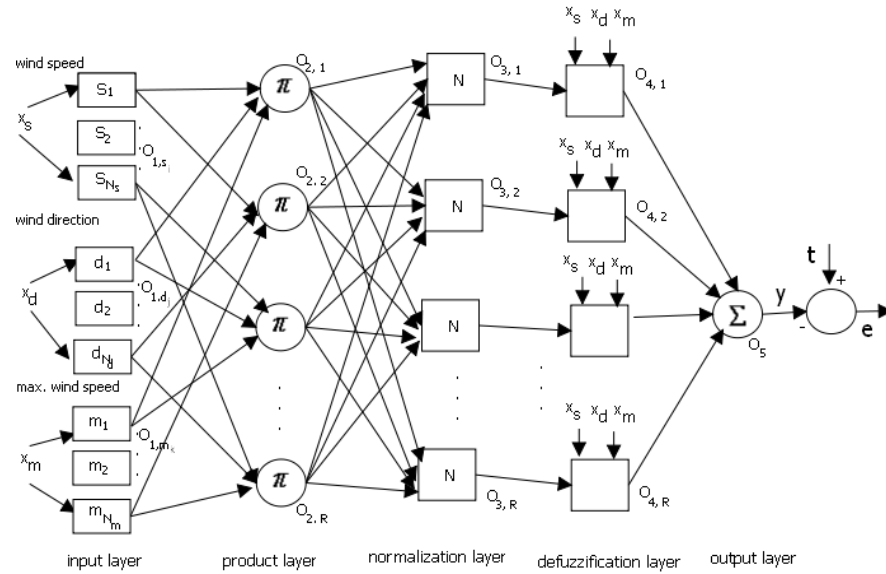


圖 3.1 調適性類神經模糊推論系統架構

第一層:輸入層(Input layer)

首先，在輸入層的輸入資料 x_s 為風速樣本(Samples)、 x_d 為風的方向樣本、 x_m 為最大風速變化率樣本。雖然高斯歸屬函數(Gaussian membership function)和鐘型歸屬函數(Bell-shaped membership function)相當類似，我們分別採用它們作為轉換函數，並比較其影響效應。方程式(3.1)所示為高斯歸屬函數及其輸出值分為 $O_{1,s}$ 、 $O_{1,d}$ 、 $O_{1,m}$ ；方程式(3.2)所示為鐘型歸屬函數及其輸出值分為 $O_{1,s}$ 、 $O_{1,d}$ 、 $O_{1,m}$ 。可以觀察出此層的模糊歸屬函數是由非線性參數所組成。

第二層:規則層(Production layer)

此層是將各輸入變數間的模糊集合進行排列組合之配對後，進行模糊邏輯運算，亦即選用 T-norm 進行模糊 AND 運算或乘積運算。此層是由非線性參數的模糊歸屬函數所組成，如方程式(3.3)所示。

$$\begin{aligned}
O_{1,s_i} &= \mu_i(x_s) = e^{-\left(\frac{x_{s_i} - \theta_{si}}{\sigma_{si}}\right)^2} \quad \text{for } i=1, 2, N_s \\
O_{1,d_j} &= \mu_j(x_d) = e^{-\left(\frac{x_{d_j} - \theta_{dj}}{\sigma_{dj}}\right)^2} \quad \text{for } j=1, 2, N_d \\
O_{1,m_k} &= \mu_k(x_m) = e^{-\left(\frac{x_{m_k} - \theta_{mk}}{\sigma_{mk}}\right)^2} \quad \text{for } k=1, 2, N_m
\end{aligned}$$

(1) 高斯歸屬函數

(3.1)

$$\begin{aligned}
O_{1,s_i} &= \mu_i(x_s) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x_s - c_{si}}{a_{si}}\right|^{2b_{si}}} \quad \text{for } i=1, 2, N_s \\
O_{1,d_j} &= \mu_j(x_d) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x_d - c_{dj}}{a_{dj}}\right|^{2b_{dj}}} \quad \text{for } j=1, 2, N_d \\
O_{1,m_k} &= \mu_k(x_m) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x_m - c_{mk}}{a_{mk}}\right|^{2b_{mk}}} \quad \text{for } k=1, 2, N_m
\end{aligned}$$

(2) 鐘型歸屬函數

(3.2)

$$O_{2,r} = w_r = \prod_{i,j,k} \mu_i(x_s) \mu_j(x_d) \mu_k(x_m) \quad \text{for } r=1, \dots, R; R = N_s \times N_d \times N_m$$

$i = 1, \dots, N_s; j = 1, \dots, N_d; k = 1, \dots, N_m$

(3.3)

第三層: 正規化層 (Normalization layer)

將上一層各節點所得的結果正規化，亦即將第 i 條模糊規則的輸出結果除以所有模糊規則之輸出結果，使其輸出值介於 0 到 1 之間，如方程式(3.4)所示。

$$O_{3,r} = \overline{w_r} = \frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \text{ for } r=1, \dots, R \quad (3.4)$$

第四層:推論層(Defuzzification layer)

將第三層獲得之正規化結果與 Sugeno 模糊模式相乘，如方程式(3.5)所示。這裡使用一階 Sugeno 的模糊模式之相關係數，亦為此層所產生的線性參數，稱為結論部分的參數。

$$y = o_{4,r} = \overline{w_r} f_r = \overline{w_r} [\alpha_r x_s + \beta_r x_d + \gamma_r x_m + \delta_r] \text{ for } r=1, \dots, R \quad (3.5)$$

第五層:輸出層(Output layer)

最後一層是總和上層各節點的輸出結果，如方程式(3.6)所示。

$$Y = o_5 = \sum_{r=1}^R o_{4,r} = \sum_{r=1}^R \overline{w_r} f_r = \sum_{r=1}^R \frac{w_r f_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \quad (3.6)$$

我們希望整個訓練資料組能夠獲得最小誤差值，通常使用最陡坡降法(The steepest descent method) 來搜尋 E 值，其最小化的過程類似誤差倒傳遞演算法(Error Back-Propagation, EBP)。假設 t_x 是第 x 個訓練資料的目標輸出值， y_x 是 ANFIS 輸出層在第 x 個訓練資料的計算推估值， e_x 是第 x 個訓練資料之目標輸出值與計算推估值的誤差平方如(3.7) 所示；當輸入第 x 個訓練資料時，ANFIS 即小幅調整加權的大小如(3.8)式：

$$E = \sum e_x, \text{ where } e_x = (1/2)(t_x - y_x)^2 \quad (3.7)$$

$$\Delta P = -\eta \frac{\partial E}{\partial P} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_x} \frac{\partial y_x}{\partial P} = \eta (t_x - y_x) \frac{\partial y_x}{\partial P} \quad (3.8)$$

式中 P 為參數的集合， η 為學習速率；但是，最陡坡降法的缺點為收斂的速度慢、計算時間長、和容易落入鄰近的局部解。我們運用複合型學習演算法 (Hybrid learning algorithm) 來改善缺失，將參數的集合分為線性與非線性集合，亦即 $P = PNL \cup PL$ ，這裡的 PNL 為第一層輸入層的歸屬函數即前提部分之參數，此為非線性集合；另一組 PL 為第四層推論層的一階 Sugeno 模型之參數，此為線性集合。利用最小平方估計法 (Least Squares Estimate, LSE) 來調整線性參數集合，以最陡坡降法調整非線性參數集合，將可以有效地搜尋參數的最佳解，同時其收斂速度也大大地獲得改善。首先將第(3.6)式改寫成為(3.9)式，其中 A 為(3.10)式，所要估算的線性參數 PL 如(3.11)式，輸出推估值向量如(3.12)式。

$$Y = \sum_{r=1}^R \bar{w}_r f_r = AP_L \quad (3.9)$$

$$A = \begin{bmatrix} \bar{x}_{s1 1} \bar{w}_{d1 1} \bar{x}_{m1 1} \bar{w}_1 & \bar{x}_{s1 2} \bar{w}_{d1 2} \bar{x}_{m1 2} \bar{w}_2 & \dots & \bar{x}_{s1 R} \bar{w}_{d1 R} \bar{x}_{m1 R} \bar{w}_R \\ \bar{x}_{s2 1} \bar{w}_{d2 1} \bar{x}_{m2 1} \bar{w}_1 & \bar{x}_{s2 2} \bar{w}_{d2 2} \bar{x}_{m2 2} \bar{w}_2 & \dots & \bar{x}_{s2 R} \bar{w}_{d2 R} \bar{x}_{m2 R} \bar{w}_R \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{x}_{sk 1} \bar{w}_{dk 1} \bar{x}_{mk 1} \bar{w}_1 & \bar{x}_{sk 2} \bar{w}_{dk 2} \bar{x}_{mk 2} \bar{w}_2 & \dots & \bar{x}_{sk R} \bar{w}_{dk R} \bar{x}_{mk R} \bar{w}_R \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$P_L = \left[a_1 \ b_1 \ g_1 \ d_1 \ a_2 \ b_2 \ g_2 \ d_2 \ \dots \ a_R \ b_R \ g_R \ d_R \right]^T \quad (3.11)$$

$$Y = \left[y_1 \ y_2 \ \dots \ y_X \right]^T \quad (3.12)$$

以最小平方估計法得到(3.9)式的最小值如(3.13)式，因

此 PL 的最佳解為(3.14)式。

$$\|AP_L - Y\|^2 \quad (3.13)$$

$$P_L = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (3.14)$$

此式中 A^T 為 A 的轉置(Transpose)矩陣， $(A^T A)^{-1} A^T$ 為 A 的擬反矩陣(Pseudoinverse)。當求得 PL 解後，固定此參數集合所有值，並將誤差值向後傳遞，再利用最陡坡降法求解 PNL 如(3.15)式，其參數如(3.16)式：

$$\Delta P_{NL} = -\eta \frac{\partial E}{\partial P_{NL}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_x} \frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} = \eta (t_x - y_x) \frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} \quad (3.15)$$

$$P_{NL} = \{ [P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sNs}], [P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dNd}], [P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mNm}] \} \quad (3.16)$$

對於高斯歸屬函數而言，這裡的參數 $P_{si} = (s_i, s_i)$ ， $i = 1, 2, \dots, N_s$ ； $P_{dj} = (d_j, d_j)$ ， $j = 1, 2, \dots, N_d$ ； $P_{mk} = (m_k, m_k)$ ， $k = 1, 2, \dots, N_m$ ；對於鐘型歸屬函數而言，這裡的參數 $P_{si} = (a_{si}, b_{si}, c_{si})$ ， $i = 1, 2, \dots, N_s$ ； $P_{dj} = (a_{dj}, b_{dj}, c_{dj})$ ， $j = 1, 2, \dots, N_d$ ； $P_{mk} = (a_{mk}, b_{mk}, c_{mk})$ ， $k = 1, 2, \dots, N_m$ 。

進一步求解非線性參數，將(3.6)式帶入(3.15)式，得到第(3.17)式和(3.18)式：

$$\frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} = \sum_{r=1}^R f_r \times \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial P_{NL}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial \bar{w}_r}{\partial P_{NL}} = \frac{\partial w_r}{\partial P_{NL}} \times \frac{1}{\sum_{r=1}^R w_r} - \frac{w_r}{[\sum_{r=1}^R w_r]^2} \times \left(\frac{\partial \sum_{r=1}^R w_r}{\partial P_{NL}} \right) \quad (3.18)$$

為了簡化說明，只針對 PNL 集合中的 P_{s1} 作偏微分結果分別如(3.19)式和(3.20)式，其餘可類推。

$$\frac{\partial w_r}{\partial P_{s1}} = \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial P_{s1}} \times \mu_j(x_d) \times \mu_k(x_m) \text{ for } j = 1, 2, \dots, N_d; k = 1, 2, \dots, N_m \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial \sum_{r=1}^R w_r}{\partial P_{NL}} = \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial P_{s1}} \times \left[\sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^{N_m} \mu_{dj}(x_d) \times \mu_{mj}(x_m) \right] \quad (3.20)$$

最後，如果選用高斯歸屬函數， $Ps1 = (s1, s1)$ ，則針對其參數偏微分結果如(3.21)式，

$$\frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial \theta_{s1}} = \frac{2(x_s - \theta_{s1})}{\sigma_{s1}^2}; \quad \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial \sigma_{s1}} = \frac{2(x_s - \theta_{s1})^2}{\sigma_{s1}^3} \quad (3.21)$$

如果選用鐘型歸屬函數， $Ps1 = (as1, bs1, cs1)$ 或簡化表示為 $Ps1 = (a, b, c)$ ，則針對其個別參數偏微分的結果如(3.22)式，

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial a} &= 2a^{-2b-1} b(x_s - c)^{2b} (1 + \left| \frac{x_s - c}{a} \right|^{2b})^{-2} \\ \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial b} &= -2 \left| \frac{x_s - c}{a} \right|^{2b} \cdot \ln \left| \frac{x_s - c}{a} \right| (1 + \left| \frac{x_s - c}{a} \right|^{2b})^{-2} \\ \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial c} &= 2a^{-2b} b(x_s - c)^{2b-1} (1 + \left| \frac{x_s - c}{a} \right|^{2b})^{-2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

本論文風載(Wind load) 影響效應運算所使用的數據是來自 INER 在台灣高雄縣路竹鄉佈建的 HCPV system 環境裡的風速計(Anemometers)所測得之結果。此數據取得時間是從 2011/5 月至 2011/7 月，共有 5 萬筆資料(包括風速、風向和最大風速變化率)作為 ANFIS 訓練用(Training data)，如圖 3.2 所示。另外時間是從 2011/8 月至 2011/9 月，共有 5 萬筆資料作為 ANFIS 測試用(Testing data)，如圖 3.3 所示。

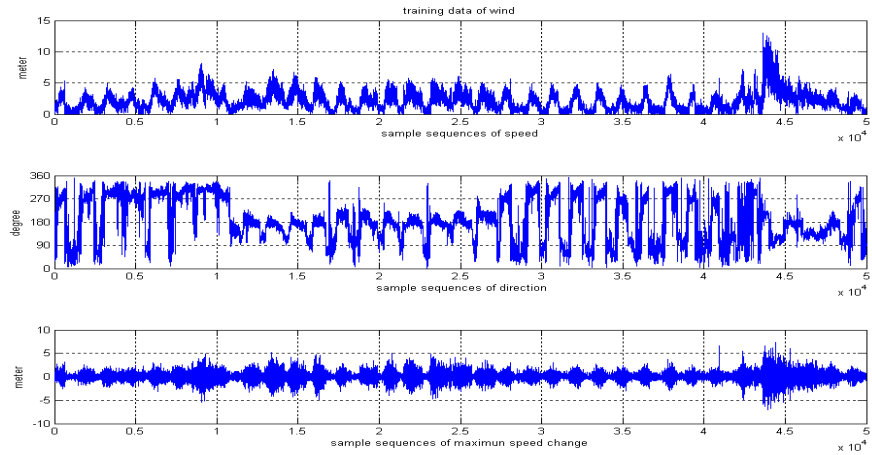


圖 3.2 ANFIS 訓練資料

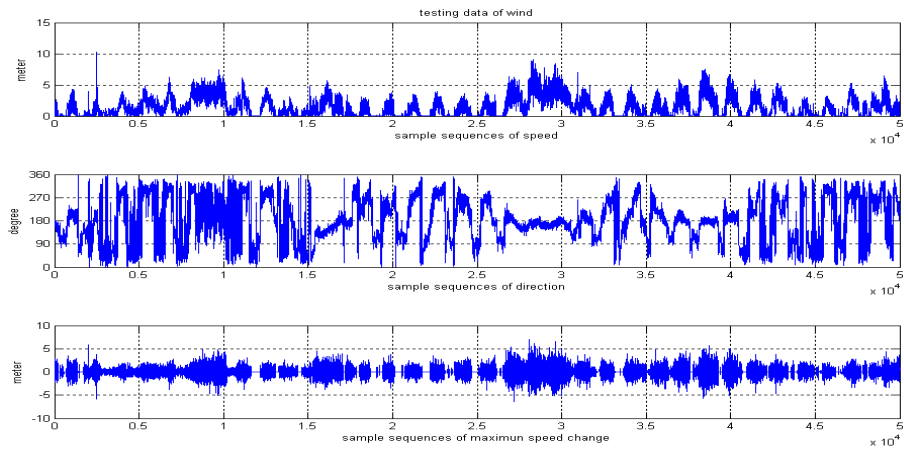


圖 3.3 ANFIS 測試資料

在輸入層中初始假設的高斯歸屬函數分佈如圖 3.4 所示，經過 ANFIS 演算法反覆訓練和調整相關參數後，如圖 3.5 所示。比較兩個圖，可以發現有明顯的變化。另外，更改初始假設的鐘型歸屬函數分佈如圖 3.6 所示，同樣經過 ANFIS 演算法反覆訓練和調整相關參數後，如圖 3.7 所示。比較兩個圖，也可以發現有明顯的變化。

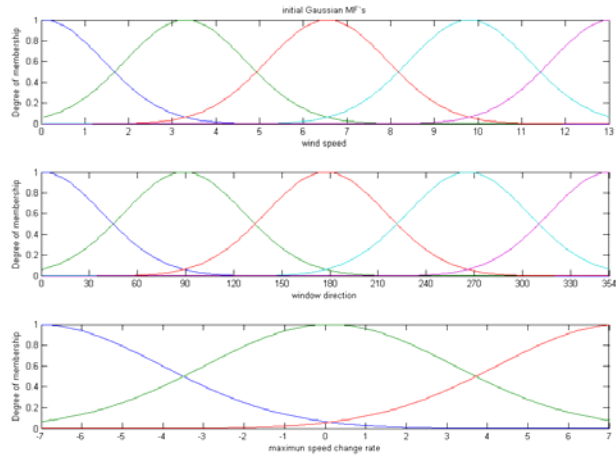


圖 3.4 高斯歸屬函數分佈初始值

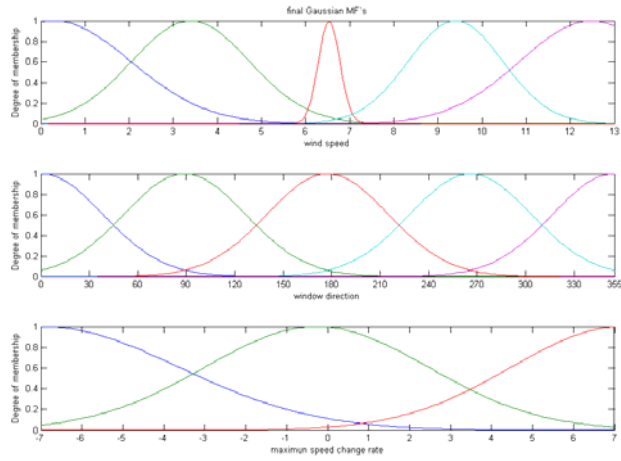


圖 3.5 高斯歸屬函數分佈訓練終止值

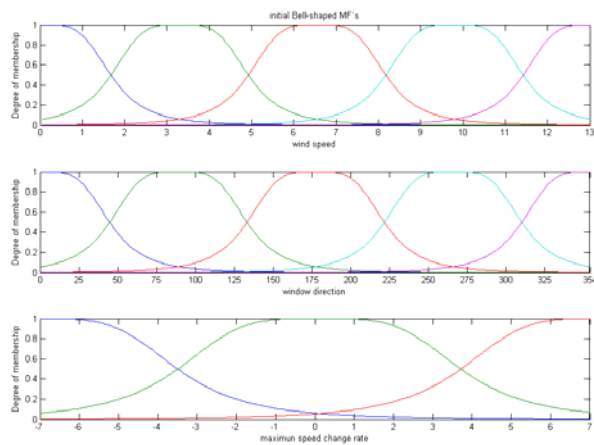


圖 3.6 鐘型歸屬函數分佈初始值

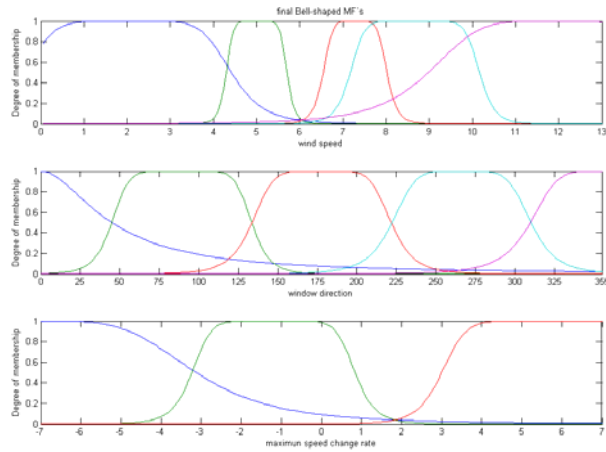


圖 3.7 鐘型歸屬函數分佈訓練終止值

此 ANFIS 訓練的終止條件是達到預設的 300 回合(300 epoch) 或者是預設的誤差已到達為止。本訓練過程中也採用測試資料來防止過度訓練(Overfitting)的情形發生。當訓練誤差(Root mean squared errors, RMSE)逐漸減少時，但是測試誤差卻開始增加時，這就是過度訓練的現象。訓練和測試的誤差曲線分別為圖 3.8 高斯歸屬函數訓練與測試誤差值分布和圖 3.9 鐘型歸屬函數訓練與測試誤差值分布。

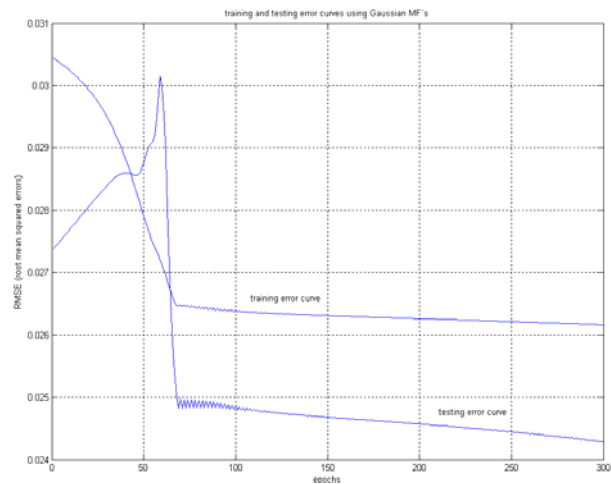


圖 3.8 高斯歸屬函數訓練與測試誤差值分布

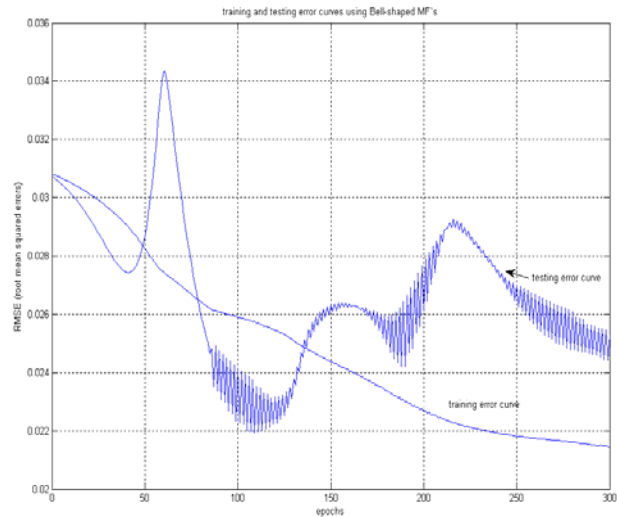


圖 3.9 鐘型歸屬函數訓練與測試誤差值分布

效能比較分析如表 3.1 所示，從這個表格裡可以得知當 HCPV system 使用 SFCD(Single factor and crisp decision)時分別有 1,644 次(Training data)和 1,262 次(Testing data)是處於 OFF-state. 另外，使用 MFFD (Multiple factors and fuzzy decision :Gaussian)則分別有 362 次和 13 次是處於 OFF-state. 如與原來 SFCD 方法做比較，則分別有 77.98%和 98.97%的效能改善。第三方法使用 MFFD (Multiple factors and fuzzy decision :Bell-shaped)則分別有 365 次和 19 次是處於 OFF-state. 如與原來 SFCD 方法做比較，則分別有 77.80%和 98.50%的效能提升。

2. 日照、溫度、遮蔽影響效應

本研究以決策樹演算法為依據，提出分類方法對資料挖礦，找出哪些是屬於正常狀況(Regular)，哪些是屬於遮蔽(Shading)現象。首先，我們需要訓練和測試的資料，圖 3.10 為不同的日照度與溫度變化時的 I-V 曲，這裡的日照度 s

從 0.2 Sun 到 1.0 Sun，溫度 T 變化從 0oC 到 75oC。圖 3.11 所示為不同的日照度與溫度變化時的 P-V 曲，這裡的日照度 s 從 0.2 Sun 到 1.0 Sun，溫度 T 變化從 0oC 到 75oC。

表 3.1 效能比較分析

Methods HCPV state	SFCD (original)	MFFD (Gaussian)	MFFD (Bell-shaped)
No. of training data	50,000	50,000	50,000
No. of ON-state	48,356	49,638	49,635
No. of OFF-state	<u>1,644</u>	<u>362</u>	<u>365</u>
效能改善	-	77.98%	77.80%
No. of testing data	50,000	50,000	50,000
No. of ON-state	48,738	49,987	49,981
No. of OFF-state	<u>1,262</u>	<u>13</u>	<u>19</u>
improvements	-	98.97%	98.50%

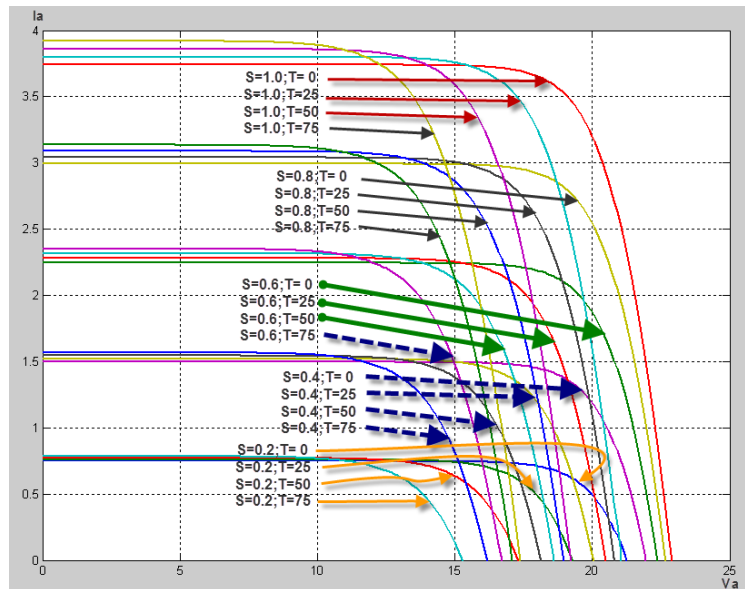


圖 3.10 I-V 曲線：不同的日照度與溫度變化

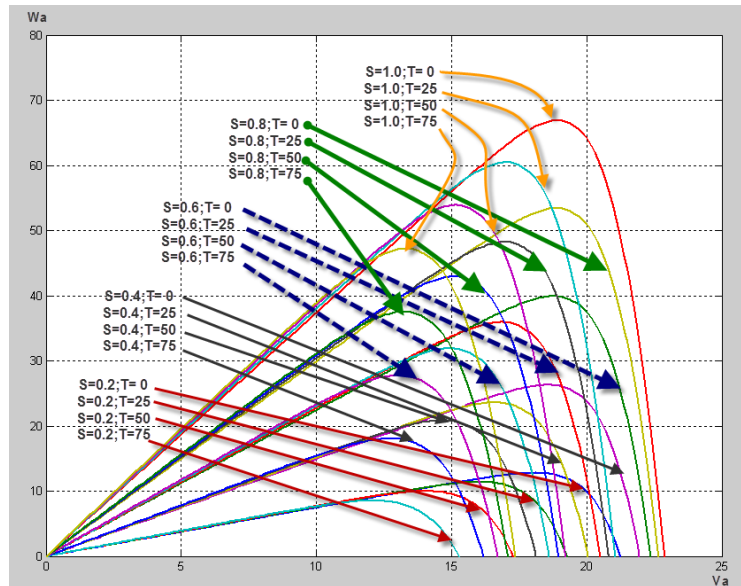


圖 3.11 P-V 曲線：不同的日照度與溫度變化

因為太陽光電陣列是由許多模組所組成的，所以獲得串聯資料是為必要，圖 3.12 是由三個模組串聯而成的 P-V 曲線，這裡的日照度為 0.6 Sun ~ 0.98 Sun，而溫度變化為 250C ~ 300C。

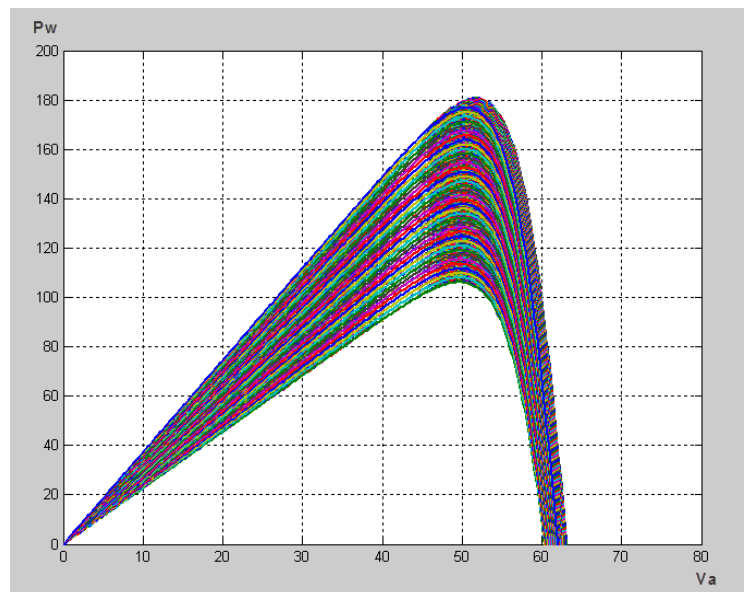


圖 3.12 P-V 曲線：由三個模組串聯而成
(日照度:0.6 ~ 0.98 Sun)；(溫度：25⁰C ~ 30⁰C)

當在正常狀況下獲得相關資料後，對於不同的遮蔽現象導致不同的輸出 P-V 曲線，其最大的輸出能量(power)是我們所需要的資料，同時，在此最大的輸出能量下，其相對的日照度、溫度、電壓值等，皆可做為分類樹的重要屬性值。圖 3.13(a)至圖 3.13(l)為三個太陽光電串聯模組在不同的遮蔽程度下，所產生的 P-V 曲線特徵分布圖。而在遮蔽狀況下最大輸出能量分布如圖 3.14 所示。表 3.2 則為訓練與測試資料。

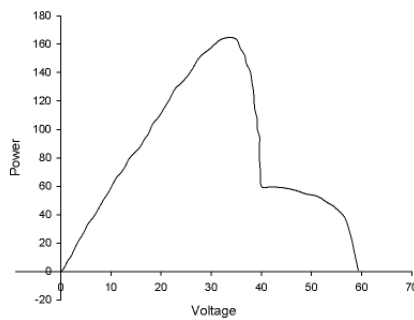


圖 3.13(a) Shading Pattern-1:

Pan1=35%;Pan2=20%; Pan3=80%

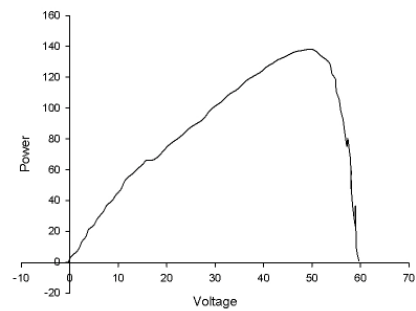


圖 3.13(b) Shading Pattern-2:

Pan1=50%;Pan2=55%; Pan3=35%

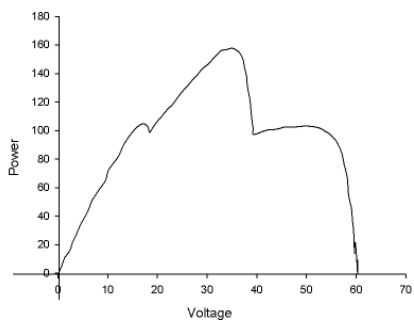


圖 3.13(c) Shading Pattern-3:

Pan1=30%;Pan2=70%; Pan3= 5%

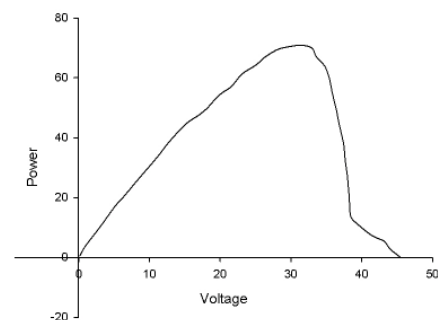


圖 3.13(d) Shading Pattern-4:

Pan1=95%;Pan2=55%; Pan3=60%

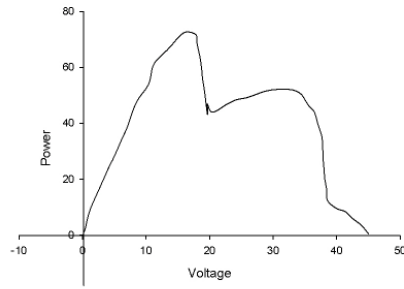


圖 3.13(e) Shading Pattern-5:

Pan1=30%;Pan2=95%; Pan3= 70%

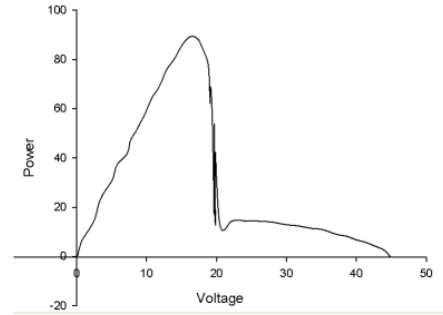


圖 3.13(f) Shading Pattern-6:

Pan1=95%;Pan2=10%; Pan3=20%

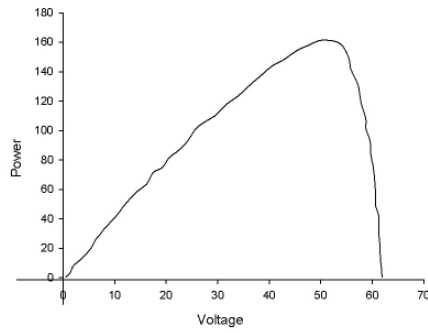


圖 3.13(g) Shading Pattern-7:

Pan1=20%;Pan2=20%; Pan3= 30%

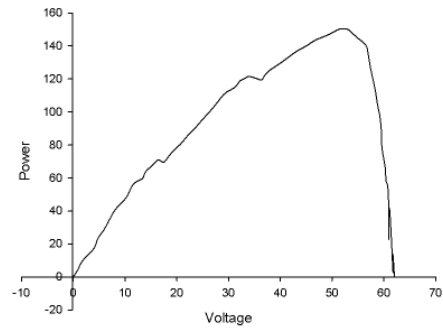


圖 3.13(h) Shading Pattern-8:

Pan1= 5%;Pan2=35%; Pan3=20%

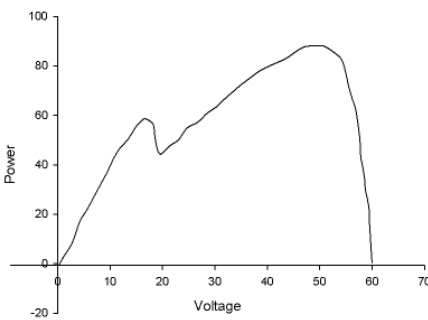


圖 3.13(i) Shading Pattern-9:

Pan1=55%;Pan2=60%; Pan3= 20%

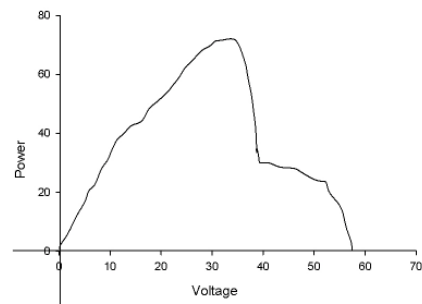


圖 3.13(j) Shading Pattern-10:

Pan1= 85%;Pan2=35%; Pan3=50%

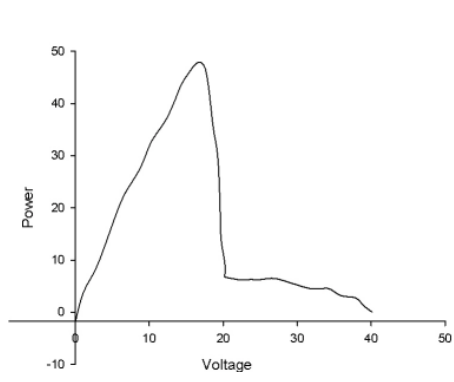


圖 3.13(k) Shading Pattern-11:

Pan1=95%;Pan2=30%; Pan3= 95%

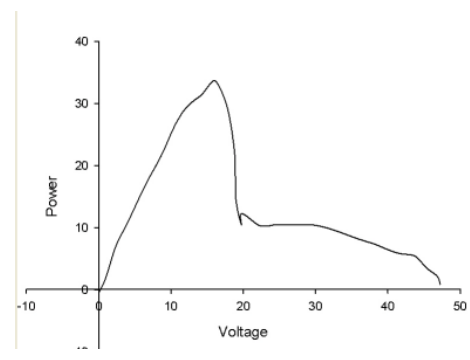


圖 3.13(l) Shading Pattern-12:

Pan1= 95%;Pan2=50%; Pan3=90%

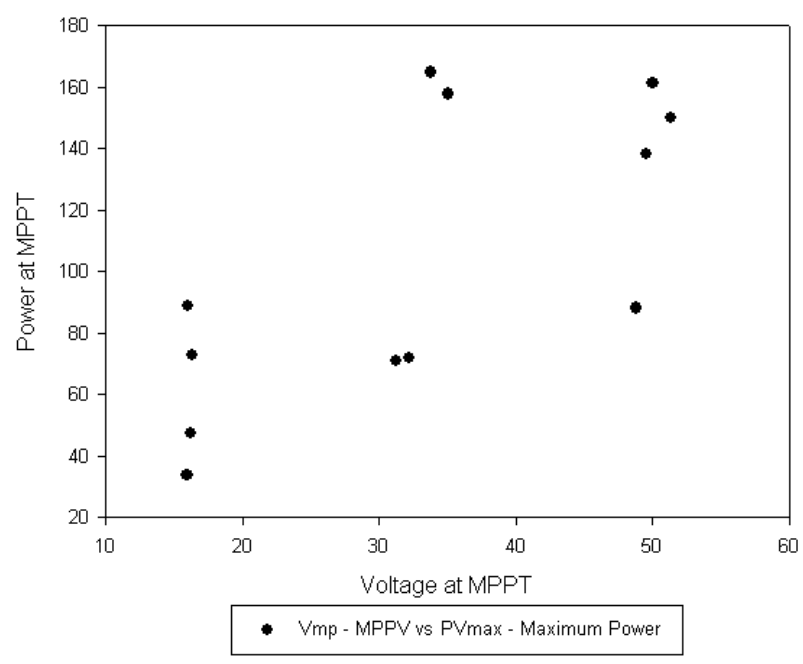


圖 3.14 在遮蔽狀況下最大輸出能量分布

表 3.2 訓練與測試資料(資料型態樣本)

	A	B	C	D	E
1	Insolation	Temperature	Voltage	Power	R(regular) or S(Shading)
2	0.8	24	51.6	147.07749	R
3	0.98	25	33.8	164.758	S
4	0.8	24.2	51.6	146.94998	R
5	0.8	24.4	51.6	146.82048	R
6	0.8	24.6	51.6	146.68897	R
7	0.98	25	49.58	138.253	S
8	0.8	24.8	51.3	146.56177	R
9	0.8	25	51.3	146.43902	R
10	0.8	25.2	51.3	146.31435	R
11	0.98	25	35.06	157.735	S
12	0.8	25.4	51.3	146.18773	R
13	0.8	25.6	51.3	146.05914	R
14	0.8	25.8	51.3	145.92857	R
15	0.98	25	31.28	70.93	S
16	0.8	26	51.3	145.79598	R
17	0.82	24	51.6	150.89076	R
18	0.82	24.2	51.6	150.76217	R
19	0.82	24.4	51.6	150.63157	R
20	0.98	25	16.3	72.6562	S
21	0.82	24.6	51.6	150.49893	R
22	0.82	24.8	51.6	150.36424	R
23	0.98	25	16.05	88.955	S
24	0.98	25	50.04	161.316	S
25	0.82	25	51.3	150.23403	R
26	0.82	25.2	51.3	150.10831	R
27	0.82	25.4	51.3	149.98062	R

常用分類規則法與技術如圖 3.15 所示，其中決策樹演算法 - ID3 (Iterative Dichotomizer 3) 是由昆蘭 (Quinlan) 於 1979 年所提出的決策樹演算法。

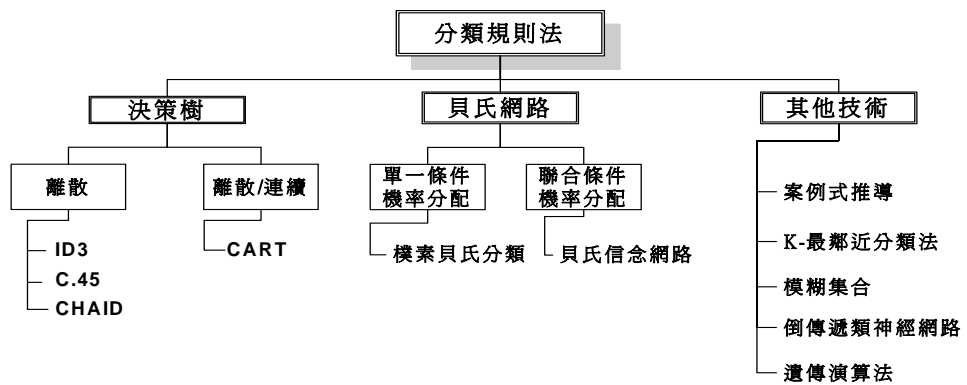


圖 3.15 常用分類規則法與技術

ID3 演算法使用雪南 (Shannon) 於 1949 年所提出的資訊理論作為選擇測試屬性的依據。假設一個事件有 n 種結果，發生的機率分別為 $P(v_1), \dots, P(v_n)$ ，這些機率都是已知的，則定義這個事件發生後所得到的資訊量為(3.23)式：

$$I(P(v_1), \dots, P(v_n)) = \sum_{i=1}^n -P(v_i) \log_2 P(v_i) \quad (3.23)$$

各種結果發生機率愈平均，所求資訊量也愈大，資訊量可以當作亂度 (Entropy) 的指標，資訊量愈大，表示亂度愈大。分類的目的是將訓練樣本分成亂度最小的子集合，也就是所有樣本都屬於同一分類標記的子集合。資訊獲利即是把測試前的資訊量減去測試後的資訊量，ID3 中以測試後資訊量最小的屬性為優先選取，也就是選擇資訊獲利最大的屬性。以下為計算資訊獲利的方法，假設分類結果為 P (正例，Positive instance) 和 N (反例，Negative instance)， A 代表某一個屬性、 X 代表屬性測試前的樣本集合、 X_1, \dots, X_v 代表屬性測試後的樣本子集合、 p 代表 X 中正例的個數、 n 代表反例的個數、 p_i 代表 X_i 中正例的個數、 n_i 代表 X_i 中反例的個數，則根據屬性 A 的值將 X 分為 X_1, \dots, X_v 所得到的資訊獲利為(3.24)式和(3.25)式：

$$Gain(A) = I(p, n) - E(A) \quad (3.24)$$

$$E(A) = \sum_{i=1}^v \frac{p_i + n_i}{p + n} I(p_i, n_i) \quad (3.25)$$

另一分類法為 C4.5 改良自 ID3 演算法，採用 Gain Ratio 來加以改進方法，選取有最大 Gain Ratio 的分割變數作為準則，避免 ID3 演算法過度配適的問題。先建構一顆完整

的決策樹，再針對每一個內部節點，依使用者定義的預估錯誤率(Predicted Error Rate)來作決策樹修剪的動作。不同的節點，特徵值離散化結果是不相同的。C5.0 演算法則是 C4.5 演算法的修訂版，C5.0 先將每一筆資料都當成是同一群，接著運用 Entropy 概念，也就是類似計算 Information Gain 的方式，從所有屬性中挑出一個最佳的，此屬性能將資料種類進行最佳分類，依此方法一直分群下去，最後資料依照屬性分隔，各自變成一群，即為葉子節點(leaf node)。C4.5/C5.0 演算法在每一個節點上可以產生不同數量的分枝。我們使用混亂矩陣(Confusion Matrix) 來作為正確度與效能的依據，如表 3.3。

表 3.3 混亂矩陣表

		True Class	
		T (True)	F (False)
Hypothesis output	P (Positives)	TP (True Positives)	FP (False Positives)
	N (Negatives)	TN (True Negatives)	FN (False Negatives)
Column counts:		T_c	F_c

正確度和錯誤率的計算方式如(3.26)式和 (3.27)式：

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{T_c + F_c} \quad (3.26)$$

$$Error Rate = 1 - Accuracy \quad (3.27)$$

本研究採用 Weka 軟體，使用 J48 演算技術，此 J48 是以完成 C4.5 分類樹演算法為基礎。其輸出的混亂矩陣結果

為：

```
=== Confusion Matrix ===
```

```
      a    b    <-- classified as
110    0 |    a = R
  4    8 |    b = S
```

正確分類率 Accuracy 為：

$$\text{Accuracy} = (TP + FN) / (T_c + F_c) = (110+8) / (114+8) = 0.9672 = 96.72\%$$

錯誤分類率為 3.28%，此皆與 Weka 軟體顯示結果一致。

```
=== Evaluation on training set ===
```

```
=== Summary ===
```

Correctly Classified Instances	118	96.7213 %
Incorrectly Classified Instances	4	3.2787 %

(二)結論

本研究提出方法乃在改善 HCPV 追日系統的穩定度、安全性和控制能力的提升，增加系統適應環境的應變程度與能力，同時增加發電的時間效能。這裡使用多因子輸入的模糊決策(multiple input factors and fuzzy decision)，不同於原本使用單因子(single input factor)即風速而已並且明確決策(crisp decision)的方式。由實際數據做實驗和模擬結果，可以獲得大幅度改進(使用本研究的數據超過 75%)，尤其是在較大風勢之下，但是風向較穩定並且和面板陣列保持接近平行之時，其改善程度更是明顯的提昇(使用本研究的數據超過 98%)。

從本研究得知使用高斯歸屬函數和使用鐘形歸屬函數，在效能方面沒有明顯的差異。最後，值得一提的是本研究使

用測試資料的效能比使用訓練資料的效能好很多，這是因為測試資料的風速強度相對於訓練資料的風速強度小很多，而且當風速強度位於臨界點(threshold value)附近時，風向角度與 HCPV 面板大都處於接近平行的狀態。然而對於瞬間刮起的大陣風(big wind gust)並且風向多變時，使陣列面板平放是更實際的做法之一。

關於日照、溫度、遮蔽影響效應的分類法研究，在正常之下(Regular Conditions)，以環境的日照量、溫度、最大電壓、最大輸出電能等屬性，建立訓練的樣本，使模型輸出歸向 Regular Conditions。在遮蔽狀況下(Shading Conditions)，以環境的日照量、溫度、最大電壓、最大輸出電能等屬性，建立訓練的樣本，使模型輸出歸向 Shading Conditions。以上相關屬性可再增加。本研究採用 J48 (C4.5)演算法，以環境影響因素如日照量、溫度、最大電壓、最大輸出電能等因素為測試樣本，判別模型的正確度(Accuracy)。

二、太陽光發電(PV)模組輸出入模式應用於 HCPV 的合適性分析之研究

本節探討 HCPV 模組的特性是否可使用傳統的 PV 模式，先由收集的資料，整理出常被引用的 PV 模式及 HCPV 模式，在模式架構及特性方程式做關聯比較，並以案例對輸出入特性進行多項式曲線配適。

(一)太陽光發電(PV)模組輸出入模式

參考 NREL(National Renewable Energy Laboratory)使用於測試及評估的光發電模組(PV Module)性能模式，主要有三種 [22]，Five-parameter model、King's model 及 Single-point

efficiency model。其中，Five-parameter Model 最常見於論文，King's Model 須要較複雜的實驗以獲得參數，但性能與五參數模式差異極少，Single-point Efficiency Model 則必須在對該項產品有充分的實驗數據及結論之後較宜使用，W.De Soto[23] 於 2005 在 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison 提出 PV 的五參數模式，五參數為 I_L (light current)、 I_0 (diode reverse saturation current)、 R_s (series resistance)、 R_{sh} (shunt resistance)、 a (modified ideality factor)，模式架構如圖 3.16。

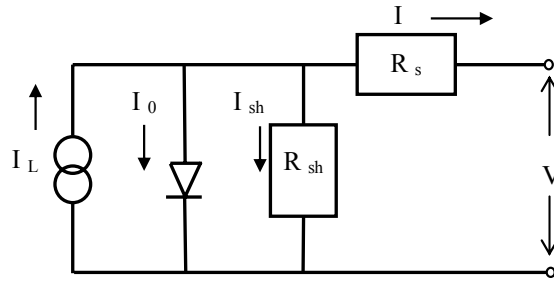


圖 3.16 五參數模式

一般情形下，五參數是日照及電池溫度的函數，由製作者提供特定條件下的數據，如：短路電流、開路電壓、最大功率時的電流及電壓，短路電流、開路電壓及最大功率的溫度係數。將量測的數據以數值方法，求出參數對溫度及日照變化的關係，以建立模式，模式的輸入為日照及溫度，輸出為輸出電壓及電流，電流-電壓特性方程式如下：

$$I = I_L - I_0 - I_{sh} \quad (3.28)$$

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{a}} \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.29)$$

$$a \equiv \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (3.30)$$

I_L : light current

I_0 : diode reverse saturation current (Amps)

N_s : number of cell in series

nI : usual ideality factor

T_c : cell temperature

k : Boltzman's constant(1.38×10^{-23})

q : electron charge(1.6×10^{-19})

PV 光發電單元(電池)的電流-電壓曲線(如圖 3.17)。

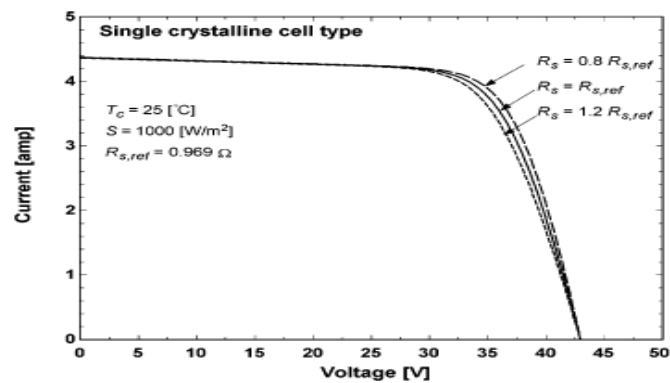


圖 3.17 PV 發電單元的電流-電壓

King's model[24]的建模步驟(如前節所述方程式 2.9~2.17)較五參數模式複雜，但比較兩者的電流-電壓曲線[25]，參考圖 3.18，空圓點為量測資料，實線為五參數模式，實圓點為 King's model，顯示五參數模式與量測數據十分吻合，而五參數模式與 King's model 兩者的特性差異很小。

至於 Single-point efficiency model 較適用於無其他的資訊或粗估目的，與本案關連性較少，因此，本案選擇 PV 的五參數模式做為探討 HCPV 模式的基準。

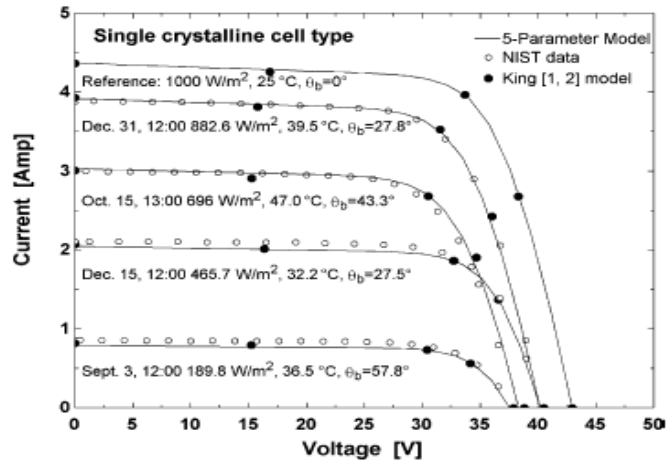


圖 3.18 PV 五參數模式與 King's model 的電流-電壓比較

(二)高聚光太陽光發電(HCPV)的輸出入模式

Spectrolab 於 2009 年發表[26], “Analytical Model for C1MJ and C3MJ CDO-100 Solar Cells and CCAs”。Concentrator Cell Assembly(CCA)是一個高聚光發電單元(電池)加上一個旁通二極體的組成，CCA 的實際尺寸如圖 3.19，圖 3.20 為其等效電路。

文件說明高聚光發電單元的電流-電壓特性方程式如下：

$$I = -I_{SAT} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nKT}\right) - 1 \right] + I_L \quad (3.31)$$

$$I_{SAT} = J_{SAT} A_A \quad (3.32)$$

$$I_L = J_L A_A \quad (3.33)$$

$$JL = RW \quad (3.34)$$

其中，

I_{SAT} : Reverse saturation current (Amps)

R_S : series resistance

n : Ideality factor

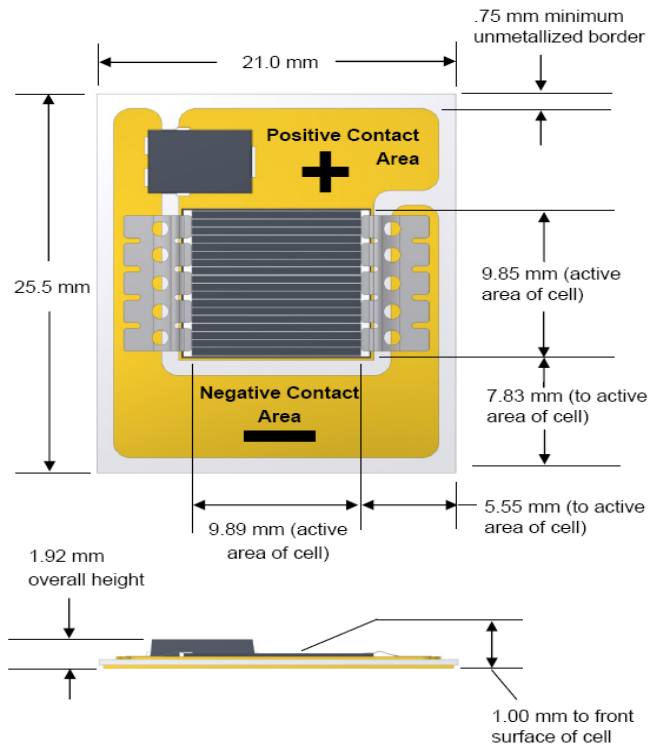
K : Boltzmann constant ($8.62 \times 10^{-5} \text{ eV}/^\circ\text{K}$)

T : Temperature (oK)

R : Responsivity (Amps/Watt)

W : Incident solar radiant intensity (Watts/cm²)

AA is Aperture area (cm²)



Physical Dimensions

圖 3.19 CCA 的實際尺寸

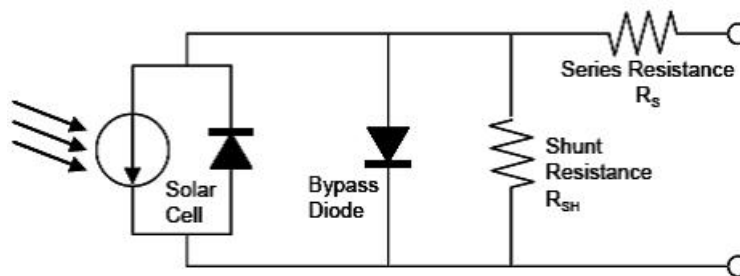


圖 3.20 CCA 的等效電路

在聚光 555x 的條件下，C3MJ CDO-100 的電流-電壓曲線如圖 3.21 為

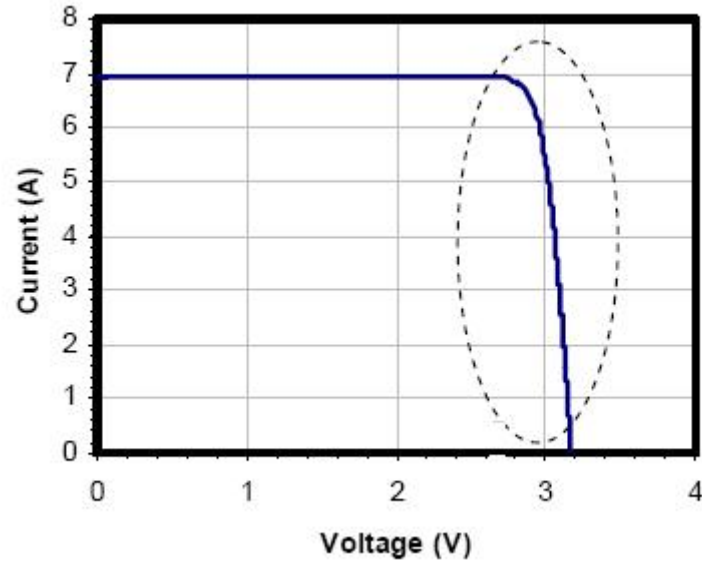


圖 3.21、C3MJ CDO-100 的電流-電壓(25°C, 50 W/cm²)

(三)比較分析

就本案研究內容 HCPV 的關聯性而言，以 PV 的五參數模式與 Spectrolab 的 HCPV 模式做關聯性的比較。

1. 等效電路

將 CCA 等效電路的旁通二極體移除，PV 與 HCPV 的等效電路比較如圖 3.22，除了光電流(I_L)及反向飽和電流(I_o 、 I_{sat})的方向定義相反以外，PV 與 HCPV 兩者具有相同的等效電路。

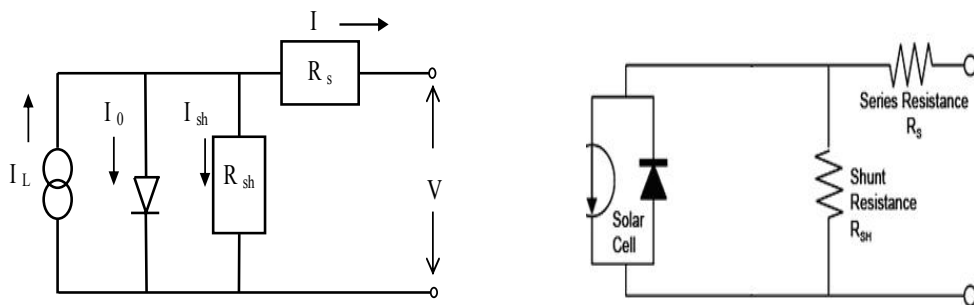


圖 3.22 PV 與 HCPV 的等效電路比較

2. 電流-電壓特性

參考圖 3.22，PV 的電流-電壓特性如下：

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V+IR_s}{a}} \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3.35)$$

$$a \equiv \frac{N_s n_I k T_c}{q} \quad (3.36)$$

HCPV 的電流-電壓特性：

$$I = -I_{SAT} \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] + I_L \quad (3.37)$$

兩者的電流-電壓特性是相同的，方程式 3.35 的 N_s 為串接的 PV 光發電電池數目，對 HCPV，方程式 3.37 則顯示為單一個的聚光發電電池，由圖 3.33 數值的大小，也可理解此一情形。

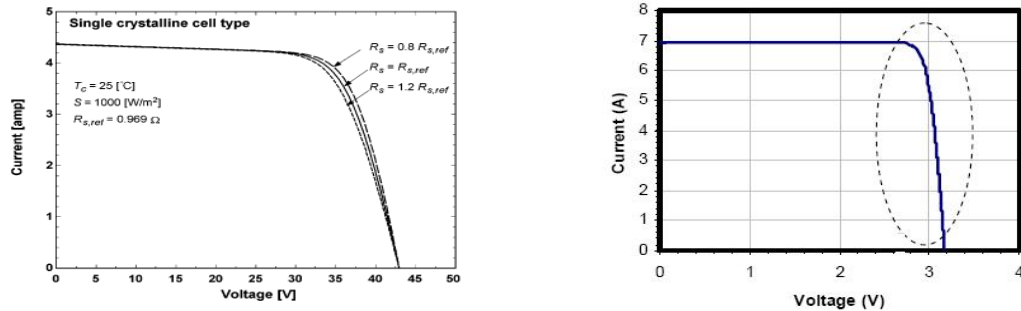


圖 3.33 PV 與 HCPV 的電流-電壓特性曲線比較

因此，初步判斷 HCPV 模式可以使用五參數模式的架構，然而基於 PV 與 HCPV 的本質差異，應可理解兩者的參數將是不同的，例如：日照的問題 PV 的光電流可以假設為與日照成正比，以一參考操作條件(ref)為基準，

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} \frac{M}{M_{ref}} \left[I_{L,ref} + \alpha_{I_{sc}} (T_c - T_{ref}) \right] \quad (3.38)$$

S: total absorbed irradiance (W/m²)

M: air mass modifier

$\alpha_{I_{sc}}$: temperature coefficient for short circuit current (A/oK)

Tc: cell temperature (oK)

其中，PV 接受直接、反射及散射的陽光，吸收的日照量(S)

$$\frac{S}{S_{ref}} = \frac{G_b}{G_{ref}} R_{beam} K_{\tau\alpha,b} + \frac{G_d}{G_{ref}} K_{\tau\alpha,d} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \frac{G}{G_{ref}} K_{\tau\alpha,g} \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (3.39)$$

G_b: beam component of total irradiance on horizontal surface (W/m²)

R_{beam}: ratio of beam radiation on tilted surface to that on a horizontal plane

$K_{\tau\alpha,b}$: incidence angle modifier at beam incident angle

G_d: diffuse component of total irradiance on horizontal surface (W/m²)

$K_{\tau\alpha,d}$: incidence angle modifier for diffuse component

β : slope of the panel(o)

G: total irradiance on horizontal surface (W/m²)

$K_{\tau\alpha,g}$: incidence angle modifier for ground reflected component

反觀，HCPV 的 IL，HCPV 僅接受直接日照，影響 IL 的參數是相對地單純，

$$I_L = J_L A_A \quad (3.40)$$

$$JL = RW \quad (3.41)$$

R is Responsivity (Amps/Watt)

W is Incident solar radiant intensity (Watts/cm²)

AA is Aperture area (cm²)

進一步的問題是如何調整輸出曲線，由規格資料及測試資料，可以得到粗略的估計值或量測值，再以多項式曲線配適 (Polynomial Curve Fitting) 方法加以調整。

$$Y = \sum_{k=0}^n a_k X^k \quad (3.42)$$

其中，X 為量測值及 Y 為理想值，經多項式配適後，求得配適的參數量，所得的多項式可使用在訂定的輸入條件下，精確地預估其輸出，以範例說明如下：

參考圖 3.34，藍色為量測值，以理想值 Y，配適出六次多項式，

$$I = (8.23 \times 10^{-7})V^5 + (-7.06 \times 10^{-5})V^4 + (2.10 \times 10^{-3})V^3 + (-2.78 \times 10^{-2})V^2 + (1.64 \times 10^{-1})V - 3.56 \times 10^{-1}$$

訂定輸入為電壓 V，範圍 0-20.5 Volt，以六次多項式求輸出功率 P，顯示如紅色圓圈，本例的誤差均方根為 0.92 W。

(四)結論

本節探討 PV 模組的模式與 HCPV 模組的關聯特性，以 PV 的五參數模式為發展 HCPV 模式的參考，HCPV 模式的架構可採用五參數模式，模式的參數則須另行定義及計算，再以多項式曲線配適的方法加以調整，例題顯示對輸出有精確的預估。

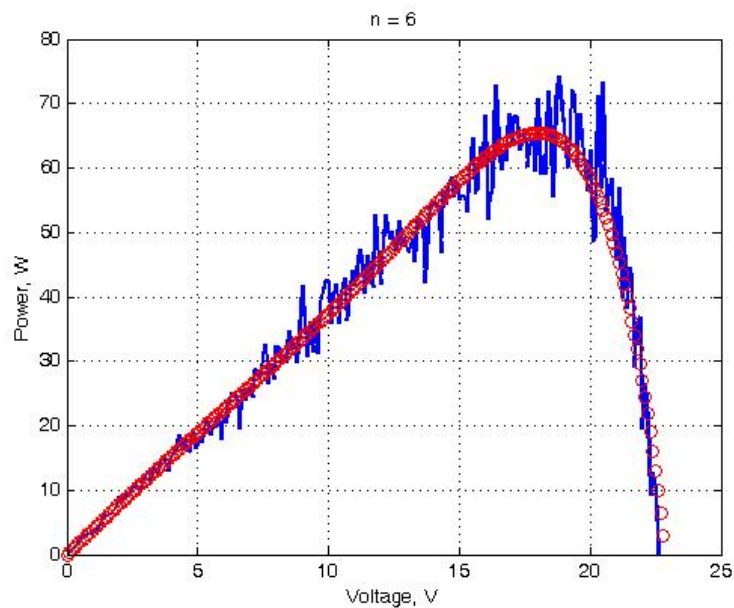


圖 3.34 電流-電壓特性曲線調整

三、太陽光發電系統的失效模式與效應分析之研究

(一)傳統 FMEA 的失效風險評價方法

1. 傳統 FMEA 中 RPN

傳統 FMEA 中將風險優先指數(Risk Priority Number, RPN)視為一種失效綜合指標(或總合風險)，其計算方式為：

$$RPN = \text{嚴重度}(S) * \text{發生度}(O) * \text{難檢度}(D)$$

其中，嚴重度(S, Severity)表失效發生對客戶可能產生不良影響的嚴重情況；發生度(O, Occurrence)表某個失效的原因發生之機率；難檢度(D, Detection)表檢測失效原因或失效機制之現行設計管控能力。而 S/O/D 的衡量標準可參考表 3.4~3.6，或依實際狀況修訂：

表 3.4 嚴重度衡量標準表[27，28]

效應	效應的嚴重度	等級
極高	失效模影響到安全操作或違反政府規定，且無警示	10
	失效模影響到安全操作或違反政府規定，但有警示	9
高	失效造成產品基本功能嚴重異常，而無法正常操作使用	8
	產品品質失效引發高度的客戶抱怨	7
中	失效造成產品之次要功能故障	6
	失效足以造成產品次功能損害，及部份的顧客抱怨	5
	影響程度較輕微，但品質會受影響	4
低	失效引起部份顧客不滿意，但尚可接受	3
	影響程度很低	2
極低	品質不受影響	1

表 3.5 發生度評估標準表[27，28]

失效機率	可能的失效率	等級
極高：失效幾乎不可避免	$\geq 1/10$	10
	$1/20$	9
高：一再重複失效	$1/50$	8
	$1/100$	7
中：偶爾發生失效	$1/200$	6
	$1/500$	5
	$1/1,000$	4
低：較少失效	$1/2,000$	3
	$1/10,000$	2
極低：不太可能出現失效	$\leq 1/100,000$	1

2. 一般依據 RPN 值的建議措施如下：

首先應針對高嚴重度，高 RPN 值和 FMEA 小組指定的其他項目進行預防/糾正措施。任何建議措施的意圖都是要依以下順序降低其風險級別：嚴重度、發生度和難檢度。

表 3.6 難檢度衡量標準表[27，28]

難檢度	檢測的可能	等級
極高	現有的管控設計，絕對無法探測出潛在失效	10
	現有的管控設計，不可能探測出潛在失效	9
高	管控設計可偵測出潛在失效僅微小機率。	8
	管控設計可偵測出潛在失效很低機率。	7
中	現行管控設計可能偵測出失效。	6
	現行管控設計可偵測出失效，如以計量值來控制。	5
	現行管控設計可在後續作業來偵測錯誤。	4
低	現行管控設計可在現場偵測出失誤。	3
	管控設計檢測出潛在失效機率很高。	2
極低	管控設計可完整地檢測出潛在失效。	1

(1) 一般實踐中，不管其 RPN 值是多大，當嚴重度是 9 或 10 時，必須予以特別注意，以確保現行的設計控制或預防/糾正措施針對了這種風險。在所有的已確定潛在失效模式的後果可能會給最終用戶造成危害的情況下，都應考慮預防/糾正措施，以便通過消除，減弱或控制起因來避免失效模式的產生。

(2) 在對嚴重度值為 9 或 10 的項目給予特別關注之後，小組再考慮其他的失效模式，其意圖在於降低嚴重度，其次發生度，再次難檢度。

3. 傳統 FMEA 失效風險評價方法遭遇的問題：

傳統 FMEA 是把發生度、難檢度、及嚴重度，分別以 1 到 10 的分數來評估。這種方式看似簡單，但是將發生機率轉換成另外一種計分系統，再以該分數相乘，基本上會有線性與非線性對應上的困難，況且往往語意上的認知(質)要轉換成計分(量)，本質上就存在著不明確的空間，故把模

糊理論導入到 FMEA 上的應用，將更具合理性與直接性。

另外，傳統 FMEA 利用 RPN 來決定問題改善優先順序的方法也存在著 RPN 為何是三者的乘積，以致最後僅以單一數值作為決策依據的不足，與發生度、難檢度、及嚴重度等三個因子沒有給予合理相對權重等的問題。

(二)改善失效風險的評價方法一-模糊理論

1. 加入模糊理論的 FMEA 失效風險評價方法：

模糊理論與傳統理論之差別，在於其允許存在屬於與不屬於之間的中介狀態，以建立歸屬度函數的方式來表示集合，藉此描述元素和集合之間的關係。同時可藉由此關係，將語意或者是口語化的敘述轉換成模糊集合後，便可透過一系列有系統的模糊運算，將語意或口語化的敘述轉換成可運用的資訊[29]。

應用模糊理論來衡量主觀判斷的過程可分為下面兩個步驟：

(1)先將語意變數所使用的語意項(Linguistic Term)轉換成模糊數。

(2)再將模糊數透過運算轉換成明確值。

兩者基本上是一個模糊化與解模糊化的過程，補充說明如下：

(1)模糊數值的表達方式：

模糊數值的表達形式有很多種，如三角形函數、梯形函數、 π 曲線形函數、S 函數、Z 函數、指數函數等，而其中三角形模糊數與梯形模糊數由於具有運算簡單，容易了解之特性，為目前最常被使用的模糊數。

A. 若模糊集合為一梯形模糊數，則其定義方程式如 (3.43)，其圖解則如圖 3.35 所示：

$$\mu_{\tilde{A}}(r) = \begin{cases} 0 & r < a \text{ or } r > b \\ 1 & m_1 < r < m_2 \\ \frac{r-a}{m_1-a} & a < r < m_1 \\ \frac{r-b}{m_2-b} & m_2 < r < b \end{cases} \quad (3.43)$$

其中 $\tilde{A} = (a, m_1, m_2, b)$ ， $a < m_1 < m_2 < b$ 。

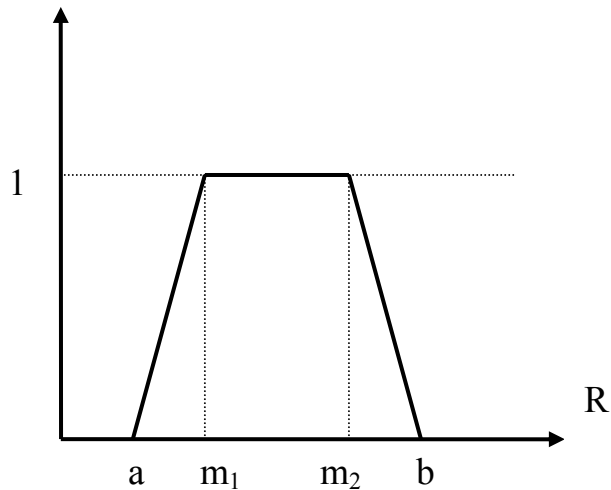


圖 3.35 梯形模糊數示意圖

B. 若模糊集合為一三角形模糊數，則其定義方程式如 (3.44)，其圖解則如圖 3.36 所示：

$$\mu_{\tilde{A}}(r) = \begin{cases} 0 & r < a \text{ or } r > b \\ \frac{r-a}{m-a} & a < r < m \\ \frac{r-b}{m-b} & m < r < b \end{cases} \quad (3.44)$$

$$\tilde{A} = (a, m, b)$$

其中 $a < m < b$ 。

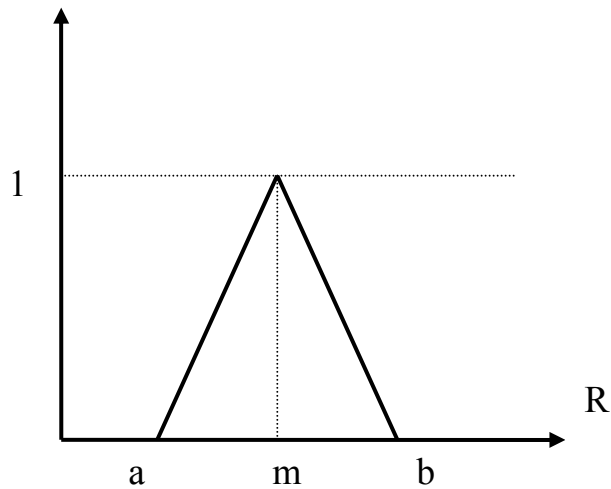


圖 3.36 三角形模糊數示意圖

(2) 解模糊化的方法：

解模糊化就是將語意變數或模糊數轉換成一個明確值。有很多不同的方式，常用的有：重心法(Center of Gravity Method)、面積中心法(Center of Area Method)、平均最大隸屬度法(Mean of Maximum Method)、距離測量法(Distance Measurement)、與最大集合與最小集合法(Maximizing Set and Minimizing Set Method) [G3]等。本計畫中選取其中合宜的最大集合與最小集合法作為研究展示用，其基本原理是利用右偏好值(最樂觀效用， $UR(i)$)與左偏好值(最悲觀效用， $UL(i)$)平均計算後得到一總偏好值 $UT(i)$ ，此模糊數轉換成的明確值。

對於梯型模糊數的解模糊方法之圖解如圖 3.37，方程式演算如下：

$$\begin{aligned}
 U_R(i) &= \frac{(b_i - x_1)}{(x_2 - x_1) + (b_i - m_{i2})} \\
 U_L(i) &= \frac{(x_2 - a_i)}{(x_2 - x_1) + (m_{i1} - a_i)} \\
 U_T(i) &= \frac{[U_R(i) + 1 - U_L(i)]}{2} \\
 &= \frac{0.5 * (b_i - x_1)}{(x_2 - x_1) + (b_i - m_{i2})} + \frac{0.5 * (m_{i1} - x_1)}{(x_2 - x_1) + (m_{i1} - a_i)}
 \end{aligned}
 \tag{3.45}$$

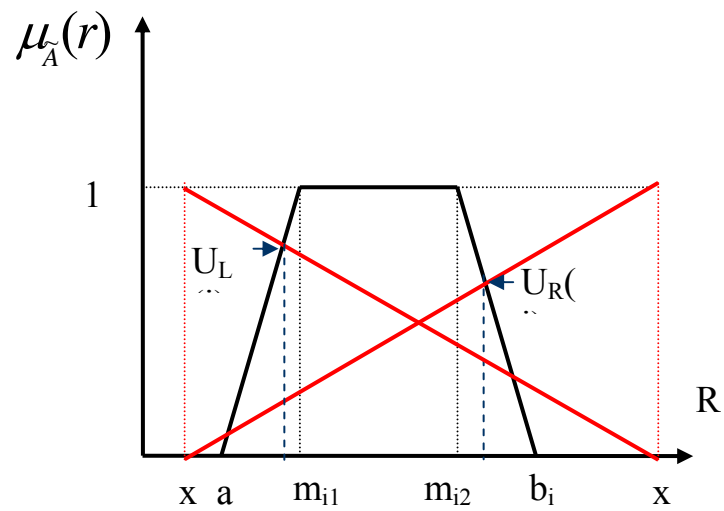


圖 3.37 梯形形解模糊數示意圖

對於三角型模糊數的解模糊方法之圖解如圖 3.38，方程式演算如下：

$$\begin{aligned}
 U_R(i) &= \frac{(b_i - x_1)}{(x_2 - x_1) + (b_i - m_i)} \\
 U_L(i) &= \frac{(x_2 - a_i)}{(x_2 - x_1) + (m_i - a_i)} \\
 U_T(i) &= \frac{[U_R(i) + 1 - U_L(i)]}{2} \\
 &= \frac{0.5 * (b_i - x_1)}{(x_2 - x_1) + (b_i - m_i)} + \frac{0.5 * (m_i - x_1)}{(x_2 - x_1) + (m_i - a_i)}
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

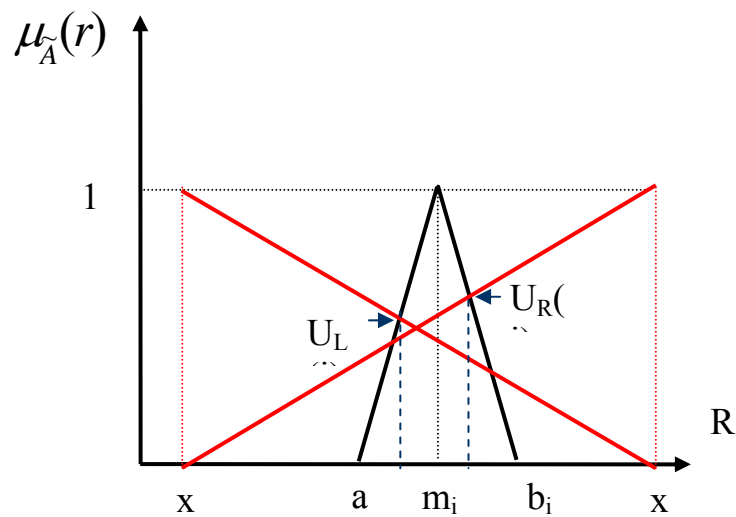


圖 3.38 三角形解模糊數示意圖

(三) 改善失效風險的評價方法二—灰色關聯分析

模糊理論可以改善傳統 FMEA 決策因子轉換成數值時對應上的困難，但 FMEA 完成評價後的問題改善優先順序則可運用灰關聯分析模型來強化。

灰關聯分析是利用灰色理論能處理系統模型之不明確性及資訊之不完整性的特點，來對離散序列間相關程度進行測

度的一種分析方法，序列中的各因子必須具備(1)關鍵因子的存在性、(2)因子的可數性、(3)因子的可擴充性及(4)因子的獨立性等四種特性。利用灰關聯分析可在多種屬性下，將不同離散序列進行優先順序的排定，而且分析過程中也可給予各因子不同的權重，這些特點正好可以補強傳統 FMEA 的弱點。

灰色關聯分析的模型建構可分以下步驟進行[30]：

1. 利用模糊方法得出各決策因子的明確數，以建立比較序列一個具有 n 個特性元素（或稱決策因子）的訊息序列，可以用

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)) \in X \quad (3.47)$$

來表示，其中 $x_i(k)$ 表示對於 x_i 之 k 個特性元素。假設各訊息列可以滿足序列之可比性，則 n 個訊息序列可以用以下之矩陣表示：

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1(1) & X_1(2) & \cdots & X_1(k) \\ X_2(1) & X_2(2) & & X_2(k) \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ X_n(1) & X_n(2) & & X_n(k) \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

因為 FMEA 決策因子是由模糊理論解出的明確數值，具備無因次性、同等級性及同極性等三條件，故滿足灰關聯序列之可比性之要求，因此，假如 $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k))$ 為 FMEA 各決策因子，而 $[X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]^T$ 就是 FMEA 各潛在失效原因之項目。

2. 建立標準序列

關聯度是表示兩個序列間的相關聯程度，因此必須建立一個期望達到的目標序列，稱為標準序列，以

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k)) \quad (3.49)$$

表示之。在 FMEA 裡其決策因子，利用解模糊方法得出的數值越小表示失效風險越低，因此標準序列可設定為最低等級，即 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k)) = (0, 0, \dots, 0)$ 。

3. 求比較序列與標準列之差序列

要解灰關聯度之大小，我們必須求各決策因子值與標準值之間的差異，稱為差序列，可以用矩陣表示如下：

$$D_0 = \begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{01}(2) & \Delta_{01}(3) & \cdots & \Delta_{01}(k) \\ \Delta_{02}(1) & \Delta_{02}(2) & \Delta_{02}(3) & \cdots & \Delta_{02}(k) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \Delta_{0j}(k) \\ \Delta_{0zz}(1) & \Delta_{0zz}(2) & \Delta_{0zz}(3) & \cdots & \Delta_{0zz}(k) \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

其中 $\Delta_{0j}(k) = \|x_0(k) - x_j(k)\|$ 。

4. 計算灰關聯係數

依據局部性或整體性關聯度，求出灰關聯係數。在 FMEA 裡其各決策因子皆須以標準序列做比較，故屬於局部性關聯度，其局部性關聯度之灰關聯係數以下式表示：

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{0j}(k) + \zeta \Delta_{\max}} \quad (3.51)$$

其中， $j=1, \dots, m$ ； $k=1, \dots, n$ ； $x_0(k)$ 為標準序列， $x_i(k)$ 為比較序列；

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\| \quad ; \quad \Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_j(k)\| \quad (3.52)$$

$\zeta \in (0,1)$: 為辨識係數，其大小僅會改變相對數值之大小，不會影響灰關聯之排序。一般而言，取 0.5 即可。

5. 求灰關聯度

在求灰關聯度時，首先須決定各決策因子之相對權重，然後代入下式求灰關聯度：

$$\Gamma(X_0, X_i) = \sum_{k=1}^n \beta_k r(x_0(k), x_i(k)) \quad (3.53)$$

其中 β_k 為各決策因子權重之大小，且 $\sum_{k=1}^n \beta_k = 1$ 。

假如各決策因子皆屬同等重要，則上式可改為下式：

$$\Gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (3.54)$$

其中 n 為決策因子的數目。

6. 排出關聯序，決定改善優先順序

依各比較序列與標準序列之灰關聯度大小排序，組成一組大小關係式稱為關聯序，假如 $\Gamma(X_0, X_i) \geq \Gamma(X_0, X_j)$ 則表示 X_i 對 X_0 之關聯度大於 X_j 對 X_0 之關聯度。對 FMEA 來講，則可表示出潛在失效原因與各決策因子最佳值之關係強弱，關聯度越大表示越接近完美，關聯度越小則表示越須及早改善。依此可得到失效問題原因改善的優先順序。

(四) HCPV 系統的失效模式與效應分析

FMEA 的實施由失效模式分析作起，必須仔細檢查每一項目的因果關係，始可瞭解全盤狀況。對於 HCPV 系統，可由其主要架構圖(參圖 3.39)為基礎，依序劃分至每個單元項

目，探討可能造成的失效模式及效應分析，及應採取有效的預防及矯正措施。

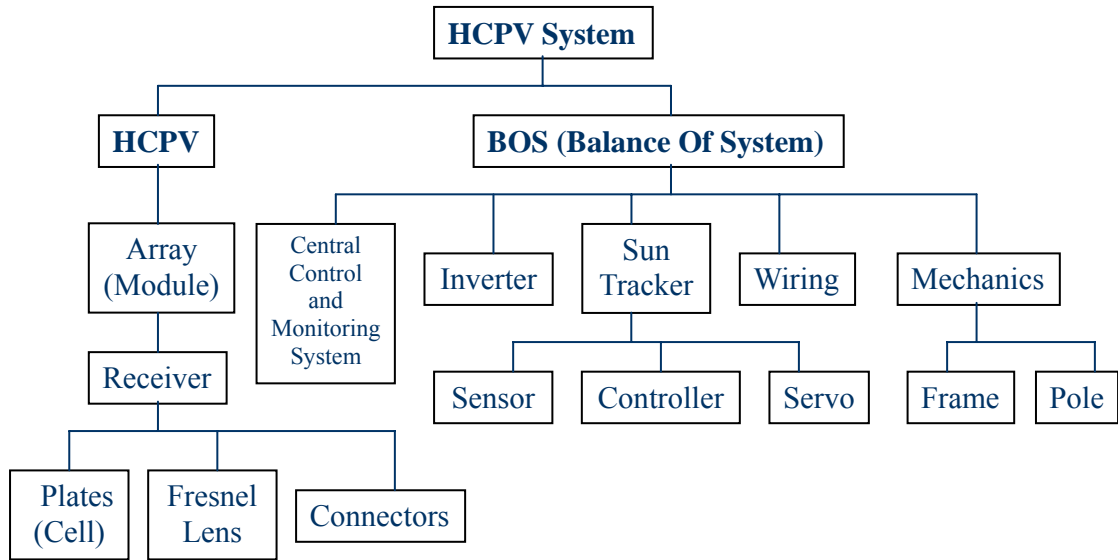


圖 3.39 HCPV 系統的主要架構圖

透過專家分析，HCPV 系統的主要 FMEA 表經綜整後完成如下表(參表 3.7)：

表 3.7 HCPV 系統的主要 FMEA 表

No.	Failure Mode	Failure Cause	Failure Result	Recommended Action	S	O	D
1	No current from array	Circuit breakers open; Module output connectors open, or wiring broken	No current flow from array	Reset circuit breakers; repair or replace damaged wiring or module output connectors	VH	L	L
2	Array current low	Some modules shaded	Drop in output current	Remove source of shading	M	M	VL
3		Some modules interconnections broken		Repair interconnections	M	L	M
4		MPPT misaligned		Align MPPT	M	M	H
5	Array current low	Some modules damaged or defective	Drop in output current	Replace affected modules	M	L	M
6		Modules dirty		Wash modules	M	M	VL
7		Some modules tilt or orientation incorrect		Correct tilt and/or orientation	M	L	M

表 3.7 HCPV 系統的主要 FMEA 表(續)

No.	Failure Mode	Failure Cause	Failure Result	Recommended Action	S	O	D
8	No voltage from array	Circuit breakers open; All modules connectors open or wiring broken	No power from array	Reset circuit breakers, repair or replace damaged connector or wiring	VH	L	M
9	Array voltage low	Interconnection wiring defective or broken, or bypass diodes defective	Drop in array voltage	Connections, or interconnection wiring	H	L	L
10		Cell defective or damaged		Replace cell	H	L	VL
11	Module leakage	Module grounding	Drop in current	Replace module	H	M	VL
12	No output from inverter	Circuit breaker open; connectors or wiring broken	No power can move through inverter	Reset circuit breaker, or repair or connectors or wiring	VH	L	M
13		Inverter failure	No power available to inverter	Replace inverter	VH	L	M
14		Time delay on inverter startup from idle	A few seconds delay after starting load	Wait a few seconds after starting loads	L	VL	M
15	Motors failure	Motor components fatigue	No power output	Replace motor	M	L	L
16	Loads operating improperly	Wiring grounding	No power output	Repair wiring	M	L	M
17		Grid abnormal		Repair grid	M	VL	L
18		Defective inverter		Replace inverter	M	H	L
19	Motors operating improperly	Limit switch failure	No power output	Replace limit switch	H	M	L
20	Tracker's position bias	Sun position sensor abnormal	Drop in output current	Check and adjust sun sensor	M	M	H
21		Controller abnormal		Check and adjust controller	M	H	H
22	Tracker does not operate at all	Defective motors	No power output	Repair or replace damaged motors	VH	L	VL
23	Load does not operate at all	Switches in the system turned off or in the wrong position	No power output	Put all switches in correct position.	H	L	L
24		System circuit breakers blown		Replace circuit breakers	H	M	VL
25	Equipment breakdown	Frame or Pole damaged	Main structure toppled	Repair or maintain the structure	VH	VL	VL

假設本研究對嚴重度(S)、發生度(O)、難檢度(D)均以如下的五等級三角函數模糊化(參圖 3.40)，則經過解模糊後各等級之總偏好值結果如下表。

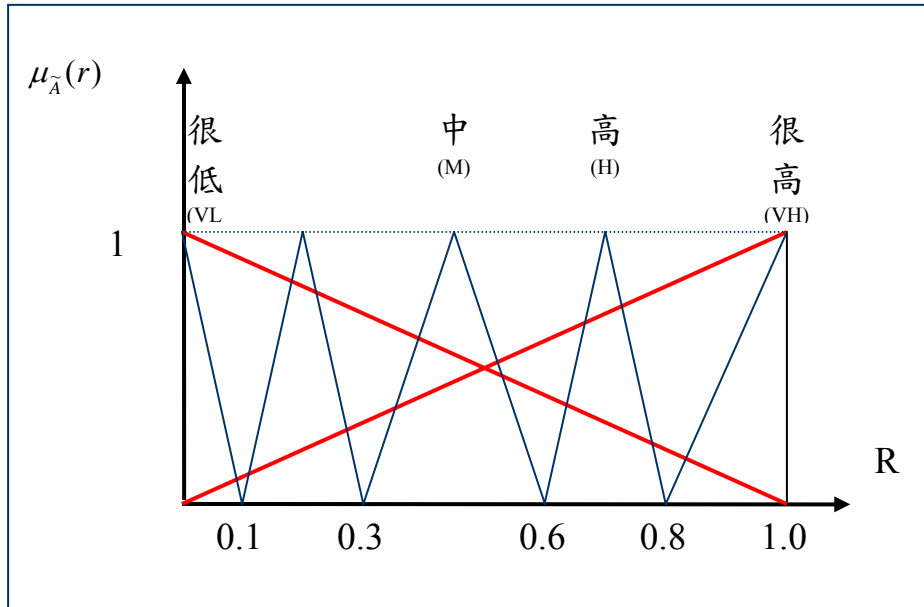


圖 3.40 五等級三角函數模糊化示意圖

表 3.8 解模糊後各等級之總偏好值

等級	x1	x2	a	m	b	U_T
VL	0	1	0	0	0.1	0.05
L	0	1	0.1	0.2	0.3	0.23
M	0	1	0.3	0.45	0.6	0.46
H	0	1	0.6	0.7	0.8	0.68
VH	0	1	0.8	1	1	0.92

HCPV 系統的主要 FMEA 表結合模糊運算與灰色關聯分析的演算後結果呈現如表 3.9：

表 3.9 結合模糊運算與灰色關聯分析的演算結果

No.	模糊評估			解模糊評估			灰關聯度	改善順序	加權之灰關聯度	新的改善順序
	S	O	D	S	O	D			(S, O, D)分別為(.7, 0.2, 0.1)	
1	VH	L	L	0.92	0.23	0.23	0.616	9	0.480	4
2	M	M	VL	0.46	0.46	0.05	0.703	19	0.599	21
3	M	L	M	0.46	0.23	0.46	0.616	10	0.591	17
4	M	M	H	0.46	0.46	0.68	0.519	2	0.544	12
5	M	L	M	0.46	0.23	0.46	0.616	11	0.591	18
6	M	M	VL	0.46	0.46	0.05	0.703	20	0.599	22
7	M	L	M	0.46	0.23	0.46	0.616	12	0.591	19
8	VH	L	M	0.92	0.23	0.46	0.554	4	0.462	1
9	H	L	L	0.68	0.23	0.23	0.642	14	0.535	10
10	H	L	VL	0.68	0.23	0.05	0.729	22	0.561	16
11	H	M	VL	0.68	0.46	0.05	0.667	16	0.524	8
12	VH	L	M	0.92	0.23	0.46	0.554	5	0.462	2
13	VH	L	M	0.92	0.23	0.46	0.554	6	0.462	3
14	L	VL	M	0.23	0.05	0.46	0.764	23	0.773	25
15	M	L	L	0.46	0.23	0.23	0.678	18	0.610	23
16	M	L	M	0.46	0.23	0.46	0.616	13	0.591	20
17	M	VL	L	0.46	0.05	0.23	0.764	24	0.662	24
18	M	H	L	0.46	0.68	0.23	0.580	7	0.551	14
19	H	M	L	0.68	0.46	0.23	0.580	8	0.498	5
20	M	M	H	0.46	0.46	0.68	0.519	3	0.544	13
21	M	H	H	0.46	0.68	0.68	0.483	1	0.522	7
22	VH	L	VL	0.92	0.23	0.05	0.703	21	0.507	6
23	H	L	L	0.68	0.23	0.23	0.642	15	0.535	11
24	H	M	VL	0.68	0.46	0.05	0.667	17	0.524	9
25	VH	VL	VL	0.92	0.05	0.05	0.790	25	0.559	15

最後結果顯示，最值得注意的 HCPV 失效模式為 No current from array、No voltage from array、No output from inverter、Motors operating at wrong speeds，其失效原因則為 Switches, fuses, or circuit breakers open, blown or tripped, or

wiring broken or corroded、Switches, fuses, or circuit breakers open, blown or tripped, or wiring broken or corroded、Switch, fuse, or circuit breaker open, blown, or tripped, or wiring broken or corroded、Low voltage disconnect on inverter or charge controller open、Inverter not equipped with frequency control 等。

四、太陽光發電系統關鍵維修工作規劃之研究

尋找關鍵維修工作的主因是在將有限的維修資源聚焦於如何消除或減少這些關鍵的失效原因，透過模糊 FMEA 與關聯性分析後，可依以下程序進行進一步的維修工作規劃：

- (1) 彙整出關鍵少數的失效模式與效應分析結果。
- (2) 彙整出失效原因以推薦維修行動。
- (3) 針對關鍵少數的失效模式建立查察機制。
- (4) 完成關鍵少數失效模式的失效排除流程圖。
- (5) 依據失效排除流程圖調整維修或維護工作規劃。

本研究則簡化綜整說明如下：

(一)完成關鍵失效模式與效應分析暨推薦維修行動

HCPV 系統的主要 FMEA 表結合模糊運算與灰色關聯分析的演算結果後，呈現的關鍵失效模式與效應分析暨推薦維修行動(取前 20%，計五項為例)如表 3.10 所示：

(二)完成維修工作規劃的查察機制與失效排除流程圖

透過關鍵失效模式與效應分析表，吾人即可進一步加以分析彙整，完成維修工作規劃的查察機制與失效排除流程圖，如圖 3.41 所示：

表 3.10 關鍵失效模式與效應分析

No.	Failure Mode	Failure Cause	Failure Result	Recommended Action	Priority
1	No current from array	Circuit breakers open; Module output connectors open, or wiring broken	No current flow from array	Reset circuit breakers; repair or replace damaged wiring or module output connectors	4
8	No voltage from array	Circuit breakers open; All modules connectors open or wiring broken	No power from array	Reset circuit breakers, repair or replace damaged connector or wiring	1
12	No output from inverter	Circuit breaker open; connectors or wiring broken	No power can move through inverter	Reset circuit breaker, or repair or connectors or wiring	2
13	No output from inverter	Inverter failure	No power available to inverter	Replace inverter	3
19	Motors operating improperly	Limit switch failure	No power output	Replace limit switch	5

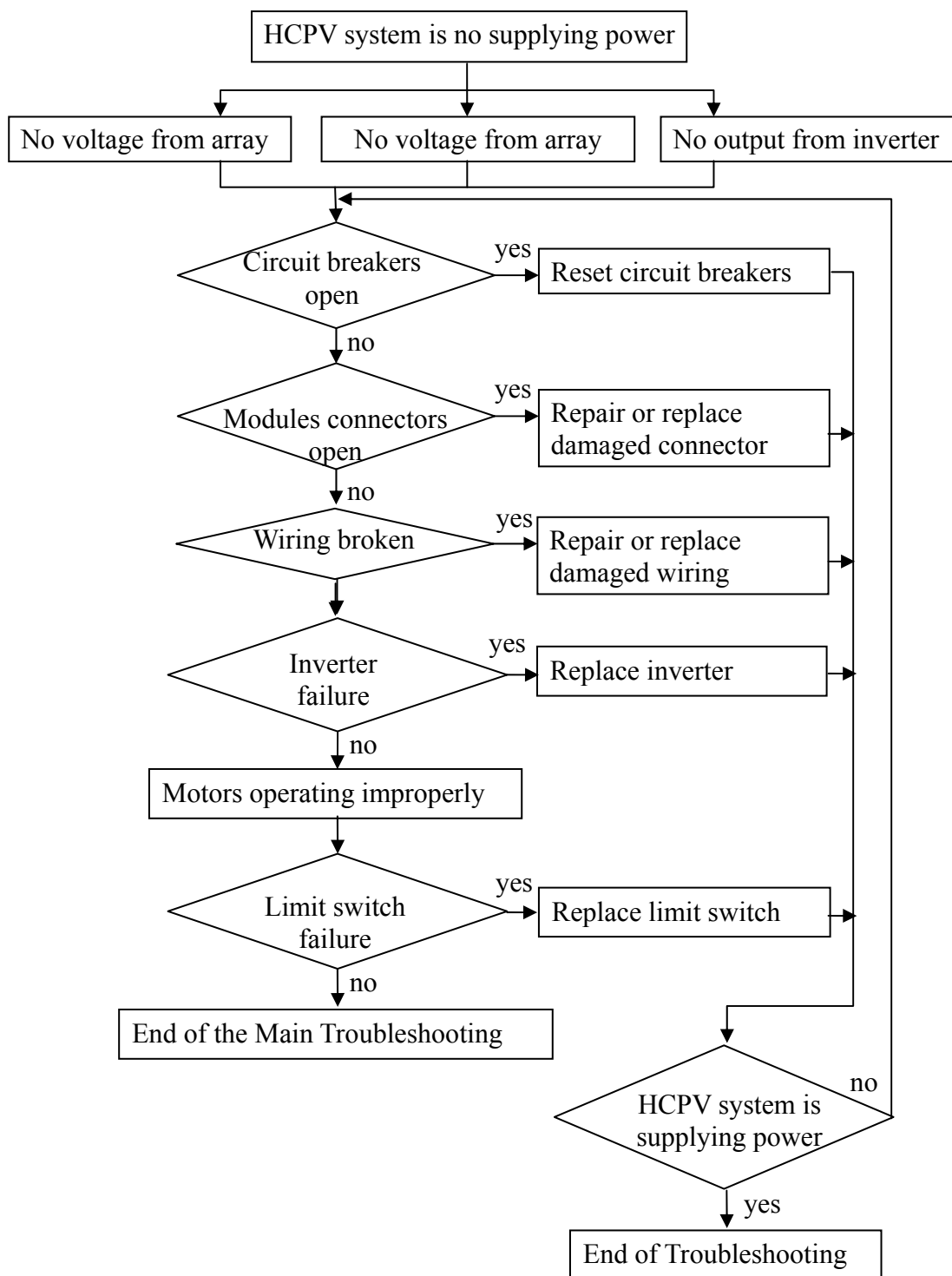


圖 3.41 維修工作規劃查察機制與失效排除流程圖

(三)調整維修或維護工作規劃

1. 維護工作時程調整

HCPV 系統維護工作時程預排之建議如表 3.11，經前述關鍵失效模式與效應分析、推薦維修行動、維修工作規劃的查察機制、與失效排除流程完成後，可據以按實際施行結果，調整最適用之維修或維護工作。

表3.11 HCPV系統維護工作時程預排之建議[31]

期間建議	主要對象	維修內涵
每日	發電狀況	檢查各項指示器是否正常顯示，否則及時修復發電
	變流器	排除任何日常操作上發生之故障
每月	產出檢查	紀錄分析電、電壓、發電量是否異常
	太陽光電陣列	1.清除表面區域過量沙、塵 2.清洗表面區域樹葉、鳥糞等影響發電之異物 3.排除不正常產生之機械應力 4.腐蝕、生鏽之處理 5.修整未正確固定之模組
每六個月	PV 接線/集電箱	1. 處理有無昆蟲進入或溼度過高 2. 熔線異常之處置 3. 腐蝕、生鏽之處理 4. 接地線、接地端子損壞處理
	配線/接地	1. 配線損傷之檢查與更換處理 2. 連接點汙損的清理、與鬆動的處置
每三到四年	變流器	1. 進行外箱腐蝕防護與除鏽 2. 操作異常之排除與清潔 3. 設置環境檢查與改善(避免水氣與高溫)
任何疑慮時	模組	異常電壓、電流之追蹤與問題解決
	PV 接線/集電箱	檢查熔線是否損壞？
	交流電防護裝備	1. 檢查斷電器、交流電熔線等是否正常？ 2. 是否會受大雷雨影響？

2. 關鍵維修工作規劃的基本精神

最主要的維修工作規劃精神是在使該做的事情可以早做或易做，注意事項如下：

- (1) 可優先對關鍵性的失效進行維修工作規劃
- (2) 使維護簡單。
- (3) 使預防與校正維護要求為最少。
- (4) 經由減少維護與支援需求，使後勤負擔為最少，這些負擔包括大量的人員和高度技術水準，複雜的支援設備與修護零件，以及特別的維護設施的儲備的。
- (5) 易於檢查與診斷。
- (6) 減少支援成本。

3. 關鍵維修工作規劃概述

關鍵維修工作規劃概述的考量則有以下幾點：

- (1) 功能性的組合考量，如模組化(Modularization)與單元化(Unitization)的要求。
- (2) 標準化與可替換性(Interchangeability)考量，如控制、簡化和減少系統個體的作業實務以及儲存問題。
- (3) 人的因素考量，如使系統維護與支援需求減至最少。
- (4) 安全的因素考量，如提供系統個體的區隔裝置與警告標示。
- (5) 取捨的因素考量，如修護/更換/報廢與成本/效益之間的衡量。

五、太陽光發電系統技術發展資料收集之彙整

以使用模式估算光發電系統的性能為例：

(一) 說明

高聚光發電的技術及運用，在近幾年發展迅速[32]，尤其，使用 Multi-Junction(MJ)已漸成趨勢，在發電的效率的改進方面，MJ 與 Si 比較有明顯的領先，如圖 3.42 所示，而各種 Cells 的發電效率預測之比較則如圖 3.43 所示。

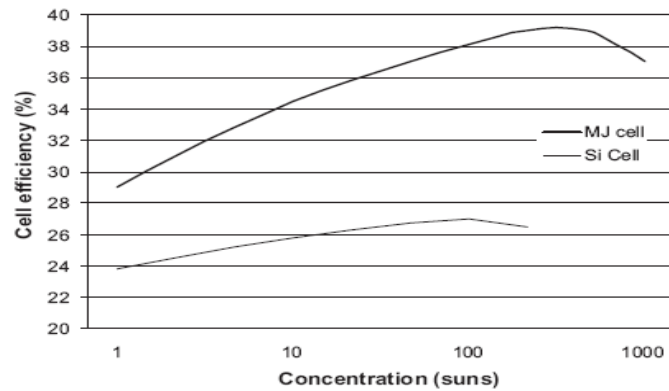


圖 3.42 MJ 與 Si 發電效率的變化

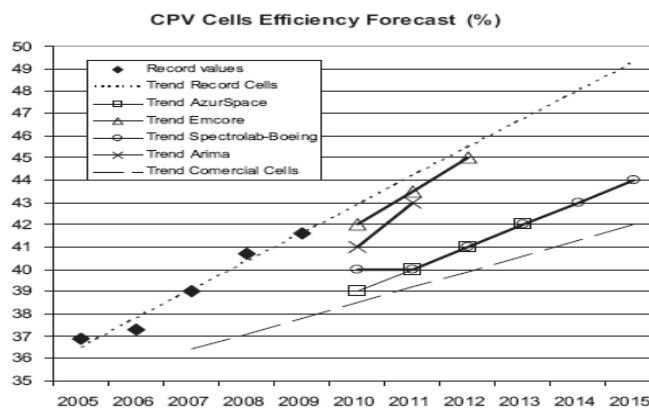


圖 3.43 對發電效率的預測

使用模式估算光發電系統的性能，是一件經常使用且必要的事，由光發電計畫的構想開始[33]，估算發電產出、成本及財務分析等，以至於對政府獎勵措施的建議。在 PV 方面，

細部的技術分析則有五參式模式、King's model[34-36]，已發展出實用而精簡的模式。依據 Triple-Junction Solar cell 主要生產廠商 Spectrolab，於 2009 發表應用註記[37]，採用五參式模式，對該公司產品進行分析。然而，若以量測為基準，量測結果顯示同一生產線的產品，不同批號，也可能有較大的性能變化[38]，如圖 3.44 為產品 C3MJ 的測試摘要，測試時間 2010.05.25-2010.07.19，X 軸為批號，每一批 55 個電池，Y 軸為效率的平均值及標準差。

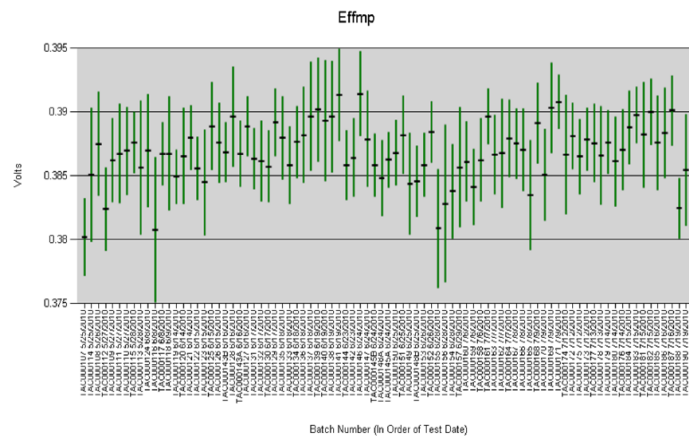


圖 3.44 C3MJ 的測試摘要

在實務上，HCPV 與直接日照的關聯性極大，直接日照又受到雲層遮蔽的影響[39]，如圖 3.45，紅線為直接日照，綠線為雲遮蔽，說明雲遮蔽極度影響直接日照。

(二)學到的經驗

由光發電計畫的構想開始，即有估算發電產出的需求，對 HCPV 而言，五參數模式是可採用的架構，各參數須依 HCPV 的特性定義，換言之，以 PV 的五參數模式可以發展理想的 HCPV 模式。實務上，從同一生產線的產品，即使不同批號，可能都有較大的性能變化，所以除了模式計算，仍有

逐一量測的必要，進一步說，HCPV 與直接日照的關聯性極大，直接日照又極度受到雲層遮蔽的影響，如何發展適用於現場的 HCPV 模式仍是一待努力的題目。

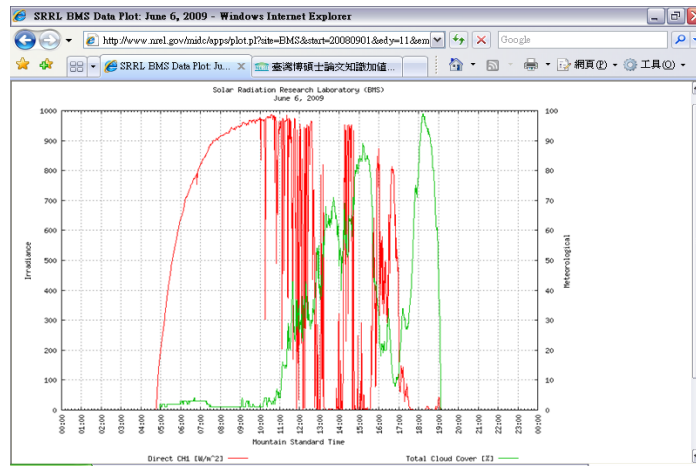


圖 3.45 直接日照與雲遮蔽

六、程式撰寫

本專案使用調適性網路模糊推論系統(ANFIS)程式，以 Matlab 軟體寫成，採用多因子的模糊輸入決策，以風速、風的方向和最大風速變化率等為影響決策的輸入因子，自行調整出最佳的模糊規則。ANFIS 將模糊推論系統與類神經網路兩種演算法結合，也就是將模糊推論系統架構於類神經網路上，使其充分發揮模式對於系統不確定性與不精確性的處理能力，同時具有自我學習與組織能力，能夠調整模式的參數。本研究使用一個具有三個輸入變數和一個輸出變數 y 的 ANFIS 架構，此 ANFIS 共有五層，其輸入變數分別是風速(s)、風的方向(d)和最大風速變化率(m)。輸出變數 y 再與目標值 t 作比較，所產生的誤差往後回饋至 ANFIS 相關各層作為調整參數之依據。

以上程式將附於結案光碟片中呈計畫委託單位存參。

七、論文發表準備與投寄(含 SCI 期刊乙篇)

(一)工作報告

研究團隊分別於 100 年 3 月 30 日、100 年 6 月 16 日、100 年 9 月 16 日、與 100 年 10 月 18 日在萬能科技大學管理與資訊系執行工作進度報告，簡報資料存放在所附 CD 之「簡報檔案」目錄中。

(二)研討會論文

於 100 年 7 月投稿萬能商學學報論文一篇，資料如附件一。

(三)期刊論文

於 100 年 10 月 12 日投稿 Reliability Engineering & System Safety (SCI 期刊)論文一篇，資料如附件二。

肆、參考文獻

一、有關計畫緣起與目的參考資料：

- [1] 台灣具備發展HCPV的優勢，
http://www.digitimes.com.tw/tw/dt/n/shwnws.asp?id=0000146773_80U8SV826R7SZC4N7OMVA
- [2] http://www.eettaiwan.com/ART_8800579971_480702_NT_1ec08a06.HTM
- [3] <http://ksp.iner.gov.tw/HCPVWebSite/DevelopStatus.aspx>
- [4] <http://forum.pvtaiwan.com/>
- [5] 能源效率坐四望六 HCPV成下一波發展重點，
<http://www.ctimes.com.tw/News/ShowNews.asp?O=201010151740306229>.
- [6] http://www.pvtaiwan.com/zh_TW/news/info.html?id=CC1AF60EAC460A8B

二、有關研究方法與過程的參考資料：

- [1] Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, pp 338-353.
- [2] Buckley, J.J.,1985, "Fuzzy Hierarchical Analysis", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 17, pp.343-350.
- [3] Cheng, Ching-Hsue , Mon, Don-Lin,1993," Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence, Fuzzy Sets and Systems 56 , 29-35.
- [4] Mon ,Don-Lin, Cheng , Ching-Hsue, 1994, "Fuzzy system reliability analysis forcomponents with different membership functions" , Fuzzy Sets and Systems 64, 145-157.
- [5] Chen, S. H., Hwang, C. L.,1992, "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making" , Springer-Verlag, New York.
- [6] Shmilovitz, D., 2005, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 2.
- [7] Aldobhani, Abdulaziz M. S., Robert J., 2008, "Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking" , Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists ,Vol II,

IMECS , 19-21 .

- [8] Bahgat, A. B. G., Helwa, N. H., Ahmad, G. E. and Shenawy, E. T. El, 2005, " Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks" , Renew. Energy, vol. 30, 1257 – 1268.
- [9] Mummadi Veerachary ,Tomonobu Senjyu and Katsumi Uezato, 2002, " Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Fuzzy Controller" , IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, VOL. 38, NO. 3, 969-981.
- [10] Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., 2002 "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system" , IEEE Power Engineering Winter Meeting.
- [11] Pandey, A., Dasgupta, N. , Mukerjee, A. K., 2007, "A Simple Single-Sensor MPPT Solution" , IEEE Trans. Power Electron.
- [12] Anil K. Jain, P.W. Duin, and Jianchang Mao, "Statistical Pattern Recognition: A Review, "IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 1, Jan. 2000.
- [13] M. Sonka, V. Hlavac and R. Boyle, "Image Processing, Analysis and Machine Vision," 2nd ed., PWS, U.S.A., 1999.
- [14] Rashad Al-Jawfi, " Handwriting Arabic Character Recognition LeNet Using Neural Network", The International Arab Journal of Information Technology, Vol. 6, No. 3, July 2009.
- [15] A. Sashua and T. Riklin-Raviv, "The Quotient Image: Class-Based Re-Rendering And Recognition With Varying Illuminations" , IEEE Trans, on PAMI, pp.129-139, 2001.
- [16] A. S. Georghiades, P. N. Belhumeur and D. J. Kriegman, "From Few to Many: Illumination Cone Models for Face Recognition under Differing Pose And Lighting" , IEEE TPAMI, Vol.23, No.6, pp643-660, June 2001.
- [17] V. V. Zhilin, S. A. Filist, Khaled Abdul Rakhim, and O. V. Shatalova, "A Method for Creating Fuzzy Neural Network Models Using the MATLAB Package for Biomedical Applications" , Biomedical Engineering, Vol. 42, No. 2, 2008, pp. 64 – 66.
- [18] NREL, "Solar Advisor Model for Photovoltaic Systems", 2008,

<https://www.nrel.gov/analysis/sam/support.html>

- [19] W. De Soto, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, 2005, pp.78-88.
- [20] G. Klise, "Models used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems, SAND2009-8258, Sandia National Laboratories.
- [21] 戴久永，可靠度導論，三民書局，1990。
- [22] 蔡閔丞，失效模式與效應分析之實作及軟體應用，正修科技大學工業工程與管理研究所，碩士論文，2009。
- [23] 簡志郎，模糊理論與 TOPSIS 法於失效模式與效應分析之應用，碩士論文，92。
- [24] <http://www.taoke.com/courseware/33955.htm>.
- [25] http://en.wikipedia.org/wiki/Failure_mode_and_effects_analysis.
- [26] Jankywolf，Failure Mode and Effect Analysis，產品開發中心培訓教材 PDC-021，版本 1.0。
- [27] 郭榮沛，「失效模式與效應分析及其應用案例研討」，機械工業雜誌，第142期，第137~148頁，1995。
- [28] 小野寺勝重，實踐FMEA手法，中衛，2001。
- [29] 先鋒可靠度研究小組，FMEA・FTA實施法-故障模式，故障樹解析與評價，先鋒企業管理發展中心，1988。

三、有關主要發現與結論的參考資料：

- [1] J. C. Wu, K. H. Lin, and C. K. Lin, "Wind Load Analysis of A Solar Tracker For Concentrator Photovoltaics", 6th international conference on concentrating photovoltaic systems, 2010, Volume 1277, pp. 145-148.
- [2] C. Cancro, G. Graditi, G. Leanza, F. Pascarella, A. Sarno, and D. Mancini, "Field Testing of the PhoCUS Solar Tracker by Means of a Novel Optoelectronic Device," in Proceeding of the 4th International Conference on Solar Concentrators for the

Generation of Electricity or Hydrogen, Spain, 2007.

- [3] J. A. Peterka, Z. Tan, J. E. Cermak, and B. Bienkiewicz, “Mean and Peak Wind Loads on Heliostats,” *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, Vol. 111, 1989, pp. 158-164.
- [4] H. Lerchenmüller , A. Hakenjos , I. Heile, B. Burger, O. Stalter, “From FLATCON® Pilot Systems to the first Power Plant” , 2007 International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, Spain, pp 1-4.
- [5] N Naeeni and M. Yaghoubi, “Analysis of Wind Flow Around a Parabolic collector (1) Fluid Flow,” *Renewable Energy*, Vol. 32, 2007, pp. 1898-1916.
- [6] F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, and M. Lopez-Martinez, “Application of New Control Strategy for Sun Tracking,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, 2007, pp. 2174-2184.
- [7] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, 1965, pp338-353.
- [8] D. Shmilovitz, “On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 152, No. 2., 2005.
- [9] Abdulaziz M. S. Aldobhani, R. John, “Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking” , 2008 Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists ,Vol II, IMECS , pp.19-21 .
- [10] A. B. G. Bahgat, N. H. Helwa, G. E. Ahmad, and E. T. El Shenawy, ” Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks” , *Renew. Energy*, vol. 30, 2005, 1257 – 1268.
- [11] Mummadi Veerachary ,Tomonobu Senjyuand Katsumi Uezato,” Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Fuzzy Controller” , *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, VOL. 38, NO. 3, 2002, pp.969-981.
- [12] N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepreechacharn., “Maximum

power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system” , IEEE Power Engineering Winter Meeting. 2002, Vol. 1, pp.372 – 377.

- [13] A. Pandey, N. Dasgupta, A. K. Mukerjee, “A Simple Single-Sensor MPPT Solution” , IEEE Trans. Power Electron, Volume 22, Issue 2 , 2007, pp. 698 - 700.
- [14] I-Tao Lung, Cherng-Tsong Kuo, Hwa-Yuh Shin, Hwen-Fen Hong, Cheng-Dar Lee, and Tsung-Te Lin, “Establishment of One MW HCPV System at Taiwan” , ISESCO Science and Technology Vision Vol. 6, No. 9, May 2010 pp.50-53.
- [15] J.-S. R. Jang, “ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems,” IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 23, pp. 665-685, May 1993.
- [16] T. TAKAGI and M. SUGENO, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 15, no. 1, pp. 116 - 132, 1985.
- [17] Soteris Kalogirou and Arzu Sencan, "Solar Collectors and Panels, Theory and Applications", Artificial Intelligence Techniques in Solar Energy Applications, ISBN 978-953-307-142-8, Edited by: Reccab Manyala, Publisher: InTech, October 2010.
- [18] Mellit, A., Kalogirou, S.A., Shaari, S., Salhi, H. & Hadj Arab, A. (2008). Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1570-1590.
- [19] Mellit, A. & Pavan A.M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. Solar Energy, Vol. 84, No. 5, pp.807-821.
- [20] Chaabene, M. & Ammar, M.B. (2008). Neuro-fuzzy dynamic model with Kalman filter to forecast irradiance and temperature for solar energy systems. Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1435 – 1443.
- [21] Moghaddamnia, A., Remesan, R., Kashani, M.H., Mohammadi, M., Han, D. & Piri, J. (2009). Comparison of LLR, MLP, Elman, NNARX and ANFIS Models-with a case study in solar radiation

- estimation. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 71, pp. 975 – 982.
- [22] NREL, "Solar Advisor Model for Photovoltaic Systems", 2008, <https://www.nrel.gov/analysis/sam/support.html>
- [23] W. De Soto, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, 2005, pp.78-88.
- [24] G. Klise, "Models used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems, SAND2009-8258, Sandia National Laboratories,
- [25] Christopher P., "COMPARISON OF PV SYSTEM PERFORMANCE-MODEL PREDICTIONS WITH MEASURED PV SYSTEM PERFORMANCE", 33rd IEEE PVSC, 2008, 6p.
- [26] Spectrolab, Application Note 0902, "Analytical Model for C1MJ and C3MJ CDO-100 Solar Cells and CCAs", 2009.
- [27] Automotive Industry Action Group (AIAG), Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA Third Edition or Fourth Edition), July, 2001 or June, 2008.
- [28] Chrysler, Ford, General Motors and Plexus QS-9000 Training System, 2000.
- [29] 簡志郎，模糊理論與 TOPSIS 法於失效模式與效應分析之應用，碩士論文，92。
- [30] 張清亮/魏秋建/李永晃，1998，灰模糊失效模式與效應分析，中華管理評論，Vol.1, No.1，pp.195~205。
- [31] 李國路/林宏志/王金印，HCPV系統整合及監控技術精進，行政院原子能委員會委託研究計畫研究報告，99。
- [32] High Concentrator Photovoltaic's Efficiencies: Present Status and Forecast ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, V15,N4, 2011, pp.1810-1815.
- [33] NREL, "Solar Advisor Model for Photovoltaic Systems", 2008, <https://www.nrel.gov/analysis/sam/support.html>

- [34] W.De Soto, ” Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, Solar Energy, 2005, pp.78-88.
- [35] G. Klise, “ Models used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems, SAND2009-8258, Sandia National Laboratories,
- [36] Christopher P., ”COMPARISON OF PV SYSTEM PERFORMANCE-MODEL PREDICTIONS WITH MEASURED PV SYSTEM PERFORMANCE”, 33rd IEEE PVSC, 2008, 6p.
- [37] Spectrolab, Application Note 0902, “Analytical Model for C1MJ and C3MJ CDO-100 Solar Cells and CCAs”, 2009
- [38] ”Efficiency Variability in Spectrolab Solar Cells”, Spectrolab, AN-1001, 2010.
- [39] <http://www.nrel.gov/midc/>

伍、附件：投稿論文

投稿萬能商學學報第十六期

模糊決策在聚光型太陽能面板於風速干擾下之應用

王金印¹、林宏志²、李國路³

¹萬能科技大學 資訊管理系暨研究所

²萬能科技大學 電子工程系

³萬能科技大學 管理與資訊系

*通訊作者

E-mail: jywang@vnu.edu.tw

摘要

本論文探討應用模糊理論的模糊知識庫(Fuzzy Knowledge Base)和模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)的演算法，處理影響聚光型太陽能發電模組的輸出效能的陣風因素，以風速、風的方向和風速變化率為依據，獲得太陽追蹤器啟動運轉的時間資訊，以利採取保護措施。

我們應用模糊理論所建立的模糊推論演算法，以風速、風的方向和風速變化率等為輸入因子，進行模糊推論，採用Takagi-Sugeno模糊模型(Takagi-Sugeno fuzzy model)，再由解模糊輸出值來做太陽追蹤器啟動或停止的決策，可避免太陽光電追日馬達在臨界點啟動或停止的轉換頻繁而受損，同時，經由MATLAB程式模擬驗證，獲得明顯的效能改善成果。

關鍵字：聚光型太陽能發電、模糊知識庫、模糊規則庫、Takagi-Sugeno模糊模型

Application of Fuzzy Decision in the Tracker Controller of High Concentration Photovoltaic Power Generation under Wind disturbance

Jin-yinn Wang¹, Horng-Jyh Lin², Gwo-luh Lee³

¹Vanung University, Dept. of Information Management and Graduate School

²Vanung University, Dept. of Electronics Engineering

³Vanung University, Dept. of Management and Information Technology

*Corresponding author

E-mail: jywang@vnu.edu.tw

In this paper, the algorithms based on the fuzzy knowledge base (FKB) and the fuzzy rule base (FRB) are built to investigate the influences of the factor of gust on the output performance of High Concentration Photovoltaic (HCPV). With the wind speed, the wind direction, and the change rate of wind blowing as key parameters, we are able to catch the information such as the starting time and the operating time length of the sun tracker.

The Takagi-Sugeno fuzzy model is applied. We have received very good results by utilizing MATLAB simulations. These results giving the sun tracker make a decision to run or stop the motor and take the required procedure to prevent the motor from damaging.

Keyword : High Concentration Photovoltaic, Fuzzy Knowledge Base, Fuzzy Rule Base, Takagi-Sugeno fuzzy model

1. 前言

隨著科技和工業的發展，能源消耗的速度也越來越快，目前人類依賴最重的石化能源不僅有耗盡的巨大壓力，更造成環境的汙染、二氧化碳的排放、地球的暖化等等問題，都使我們不得不急思解決之道。因此，如何發展新的替代能源，尤其是綠色能源，乃是當前重要課題。替代能源基本上是指燃煤、石油、天然氣、核能以外的能源，包括太陽能、風力、地熱、海水溫差、波浪、潮汐、黑潮、生質能及燃料電池等之電源。而又由於對地球環保意識的普遍受到重視，所需的替代能源均朝向可以滿足低環境污染、可循環利用的條件要求為重點。而在多種替代能源技術中，可取之不盡用之不竭的太陽能轉換成電能運用，是最自然且永續的思維。太陽能沒有枯竭問題，沒有熱污染與廢氣等問題，世界各地都可以公平的取得，沒有蘊藏量與壟斷的紛擾，無疑地是最具有潛力的能源，這些特性都使得太陽能發電產業成為最搶眼的明日之星。

2010年台灣亞太產業高峰論壇暨台灣國際太陽光電論壇(20101026~27)報導[1]「iSuppli日前發表的研究報告指出，2011年全球太陽能系統安裝量可望由2010年底的14.2GW攀升至20.2GW。歐盟公布的「2010年太陽能電池現況報告」(PV Status Report 2010)，2009年全球太陽能電池產能為11.5GW，較前年成長56%，而過去5年產量增加最快的是中國和台灣，加起來已佔全球近50%，證明太陽能電池的生產重鎮已經從歐洲轉移到亞洲，前四大太陽能電池製造基地分別為中國、台灣、德國和日本」，此次論壇展覽中並推出「HCPV專區」[2]，首次邀請到美國波音公司子公司且是目前砷化鎵電池業界權威的SpectroLab總裁David R. Lillington、美國知名且是全世界最大的HCPV製造廠商SolFocus行銷副總Nancy Hartsoch，及億芳能源科技總經理陳以禮，針對高效率電池製造、HCPV技術及市場分析，以及台灣本土之HCPV製造能力及供應鏈完整性進行探討，由此可見發展HCPV的重要性。HCPV因具有節省電池原料、降低發電成本和維持高發電效率的優點，非常適合用於太陽能發電場之設置，已成為全球太陽能建廠的新選擇，在台灣太陽能產業中也勢必成為發展重點[1, 3]。然而HCPV若以產業的角度視之，它是一項具有高轉換效率，但也同時具高複雜度與成本的产品。若進一步以使用者的角度視之，重點必在於如何保證其在建置運轉後，能夠維持系統高效能的操作與可用度。故不論是系統的供給者或使用者，均須對影響系統效能的因素、系統的輸入輸出轉換模式、失效的模式與影響、及維修工作的規劃等方面深入了解，以有所因應。

本研究的高聚光太陽光發電(HCPV)系統是由多座太陽光電面板所組成，而影響太陽光發電效能的因素包括：日照時間、追蹤太陽的準確性、聚光器及相關使用裝置的擺設方式、風力對面板的衝擊，空氣污染的影響、散熱的影響、...等。本研究主要是針對風力的影響提出改善方法。由於HCPV每一座的面積龐大，對於陣風的影響極為敏感。為了避免損壞模組馬達，特訂定運轉規則為當風速偵測到風速大於每秒K公尺(命名為臨界點 Critical Point, CP)時，即停止追日系統馬達的運轉功能，此方式雖然可保護HCPV模組和馬達裝置，但是也影響發電效能至鉅。研究發現，當風向並非正面吹向HCPV面板時，縱使其風速超過臨界點之外，但是其垂直分量卻有可能落在臨界點之內。此外，當風速正處於臨界點正負範圍之內時，此一分為二的決策，將因HCPV需要進行安全保護措施，導致追日系統馬達啟動或停止之變動頻繁而損壞。

我們應用模糊理論所建立的模糊規則庫和推論演算法，以風速、風的方向和風速變化率等為影響決策的輸入因子，進行模糊推論，再由解模糊輸出值來做太陽追蹤器啟動或停止的決策，可避免太陽光電追日馬達在臨界點啟動或停止的轉換頻繁而受損。

2. 文獻探討

模糊理論的基本概念是運用了模糊邏輯(Fuzzy Logic: FL)，它是以法則為推理基礎的一種人工智慧，但可容忍不確定性的資料，可使用近似值或主觀值來進行推論。其基礎是一套模糊集合論，它是在1965年由美國加州柏克萊大學Zadeh教授首先於 Information and Control 學術期刊發表[4]，日後廣泛地被應用於一些語意不明與不確定性的資料處理。模糊理論不是用某一個明確的數值來衡量事件資料，而是使用「隸屬函數」(membership function)來量化、描述該事件與某個模糊概念的關係。隸屬函數的種類大致上分成五種，包含：三角形(Triangular shape)、梯形(Trapezoidal shape)、S函數(S function)、Z函數(Z function)、及II函數(PI function)等。其中隸屬函數值設定介於0到1之間，用來描述各個元素屬於某個集合的程度，若隸屬於某個概念的程度越大，則其隸屬函數值越接近1；反之，隸屬函數值則越接近0。其特點是更接近人類的

判斷思考，取代了傳統的精確邏輯(Crisp Logic)，避免了以點來切割所產生的問題，而能用於處理不確定因素的系統。

其後更進一步的發展至模糊層級分析法(Fuzzy Analytic Hierarchy Process : FAHP)，其起因是對一個問題需要做決策時，經常會發現它是由一些複雜因素所組合，包含有形的及無形的因素，這些因素之間彼此相互影響。層級分析法發展的目就是將一個複雜的問題，切割成不同的層級，降低複雜度與關聯度，提供決策者作出較佳的決策方案。層級分析法是加州大學Thomas L. Saaty教授在1971年協助美國國防部從事應變計畫研究時所提出的，主要用於不確定情況及具有多個評估準則的決策問題上。其後逐漸成爲一項解決各種決策問題的方法，其應用範圍極爲廣泛。但是在人類主觀及情感世界裡存在許多不確定性的因素，加入模糊法則可補足了傳統層級分析法中具有資訊不足、不明確和模糊性的決策行爲，使其更能反應現實世界中的情況。在傳統的層級分析法中，其成對比較法之比值皆爲明確的數值，以利建立成對比較矩陣，但會有主觀、不精確、模糊等問題產生，所以Buckly[5]提出的作法是以梯型模糊數 (trapezoidal fuzzy number) 來表示成對準則相互比較的重要程度，而形成模糊正倒值矩陣。其模糊尺度，採取{1/9, 1/7, 1/5, 1/3, 1, 3, 5, 7, 9}等九個數。Cheng and Mon [6, 7]則提出利用模糊數的區間代數運算及分割原理，進行模糊可靠度的分析。1974年 E. H. Mamdani 教授在蒸汽機自動運轉控制上成功地驗證了模糊邏輯控制器的優越性能，此後便造成一股研究風潮，現今已經用在相當廣泛的領域，例如在模糊控制系統(Fuzzy Control System)、模糊分類(Fuzzy Clustering)、圖形識別(Pattern Recognition)、決策分析 (Decision Analysis) 等方面上。尤其在控制系統上，近年來有相當多的學者在這方面投注心力 [8]。

模糊理論也常常與其他演算方法結合使用，例如模糊理論與類神經網路的結合，模糊理論與基因演算法的結合應用，模糊理論與螞蟻演算法的整合等。模糊理論也被用於太陽光電系統上，主要都是集中在處理最大功率追蹤技術(Maximum Power Point Tracking, MPPT technique) 的問題上[9-14]，也有用在水力系統上[15]。然而，對於應用在風力對太陽能聚光發電的影響方面之研究，則極爲少見。

3. 研究目的與方法

太陽能聚光發電模組的佈建範圍遼闊，其陣列面板的面積龐大，受到陣風吹襲的影響力甚鉅。爲了保護太陽追蹤器之馬達的正常功能，避免受損，太陽追蹤器在風速大於臨界點(K公尺/每秒)時，被設定停止啓動運轉而進行保護措施，但是在風速臨界點時將產生開關動作頻繁的問題。爲了解決此問題，減少過度的機械反應，我們應用模糊理論的原理，改變傳統明確集合的絕對屬於之概念而擴充至相對屬於的概念，做出模糊的決策，控制太陽追蹤器啓動的時機，可防止控制馬達在臨界點上啓動與停止來回變動的不正常現象，達到保護其馬達機組的目標。本模糊推論系統有三個輸入變數，分別是風速、風向、和風的變化速度，而系統的輸出變數爲控制器的啓動區或停止區，亦即輸出如果落入啓動區，則追日系統的馬達持續運作，反之，則停止馬達運轉功能而進行保護措施。

本文作者曾用模糊方法，採用多因子的模糊輸入決策，以風速、風的方向和風速變化率等爲影響決策的輸入因子，經由MATLAB程式模擬，再由解模糊輸出值來做太陽追蹤器啓動或停止的決策，獲得明顯的效能改善成果[16]，可避免太陽光電追日馬達在臨界點啓動或停止的轉換頻繁而受損。先前的方法在輸出項目採用最大-最小合成法(MAX-MIN Composition)和Mamdani模糊推論演算法(Mamdani Fuzzy Inference) [17]，對於前提部採用and運算，取得最小運算值，對應到運轉-停止((Run_Stop)歸屬函數的輸出，再經過推論部最大運算後，可獲得最後的推論圖形。根據模糊理論，此推論圖形必須再經過解模糊化(Defuzzification)的過程，求得一個明確的輸出量，以作爲馬達控制系統的啓動或停止的判別，該論文採用重心法模糊化(Centroid defuzzification)。

本研究主要是進一步提升運算的速度，而Mamdani方法雖然可以用更直接、更接近人類的方式來描述專家的意見，但是，Mamdani方法的模糊推理需要透過整合連續變化的函數找到二維形狀的重心點，計算量大，尤其是在動態非線性系統中，整個過程的計算效率不高。1985年Takagi 和Sugeno[18]提出單態(singleton)模式，是一種帶有歸屬函數的模糊集，該歸屬函數在論域某個點的值爲1，其他則爲0。Takagi-Sugeno模糊規則與Mamdani方法類似，唯一不同的是推

論的後項如(1)式所示：

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ AND } y \text{ is } B \text{ THEN } z \text{ is } f(x,y) \quad (1)$$

這裡的 $f(x,y)$ 為數學函數。假如 $f(x,y)$ 等於常數 k ，則是最常用的零階Takagi-Sugeno模糊模型(Takagi-Sugeno fuzzy model)，亦即輸出歸屬函數是由單態尖峰來表示。

4. 定義模糊輸入與輸出變數

首先，本研究是以相鄰模糊數重疊之原則，建立對應之梯形模糊數(a/b/c/d)，其中a與d為模糊數的左右兩端點，而b與c為模糊數的中間頂點。此梯形模糊歸屬函數之方程式如(2)所示。令S為風速的模糊集合(Fuzzy Set)， $\mu_S(\cdot)$ 為其歸屬函數(membership function)，s為元素(Element)，U為論域(universe of discourse)，則風速的模糊集合表示為方程式(3)所示。

$$f(x, a, b, c, d) = \left\{ \begin{array}{l} 0, x \leq a \\ \frac{x-b}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \\ 0, d \leq x \end{array} \right. \quad (2)$$

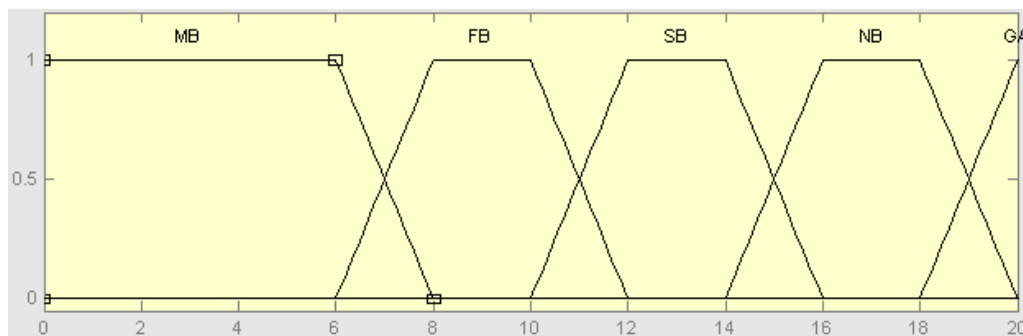
$$S = \{(s, \mu_s(s)) \mid s \in U\} \quad (3)$$

現對於風速這個輸入變數，進行模糊語言的描述與歸屬函數的建立。關於風速等級之模糊理論的論域(Domain)是參考蒲福氏風級表(Beaufort Scale)進一步修改定義的。此蒲福氏風級表是由英國人弗朗西斯·蒲福(Francis Beaufort)於1805年根據觀察航行的船隻狀態及海浪而編制，適用於海上的觀測。後來為了適用於路地，從觀察煙、樹葉及樹枝的搖動、或旗幟的搖動狀態而編制，主要是依據風對地面物體或海面的影響程度而定出的風力等級。按照風的強弱，劃分為13個等級，從0至12等級。到了1950年代發明測風儀器，實際上所量測到的風速已超出了12級，於是將風級擴展到17級成爲18個等級。

假設原來訂定風速的臨界點爲S (公尺/每秒)，本研究關於風速的模糊論域範圍介於 0 至2倍S (公尺/每秒)之間來定義模糊歸屬函數。本研究共分為五級，其定義如表一所示。其模糊歸屬函數如圖一所示。茲舉例說明風速的模糊歸屬函數如下，如果令 $K = 10$ ，則論域範圍 = { 0 ~ 20 }，同理，如果令 $K = 12$ ，則論域範圍 = { 0, ~ 24 }，以此類推。

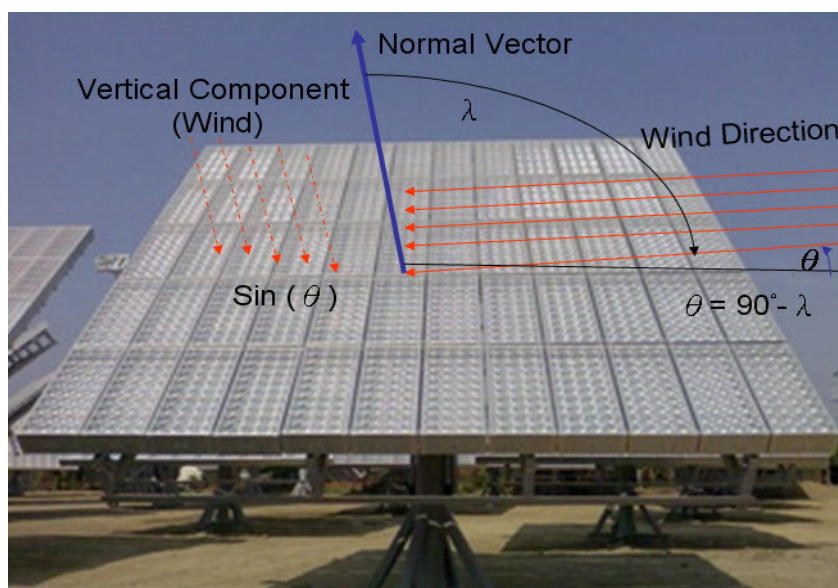
表一 定義風速的模糊歸屬函數(論域範圍: 0 ~ 20)

風速大小程度(speed:S)	定義梯形模糊歸屬函數
MB (moderate breeze) 無風~和風	(0 0 6 8) m/s
FB (fresh breeze) 清風	(6 8 10 12) m/s
SB (strong breeze) 強風	(10 12 14 16) m/s
NB (near gale) 疾風	(14 16 18 20) m/s
GA (gale) 大風	(18 20 20 20) m/s



圖一 風速的模糊歸屬函數(橫軸為風速，縱軸為隸屬度)

第二個輸入變數為風吹的方向，本研究的高聚光太陽光發電（HCPV）面板整座的體積龐大，對於陣風的影響極為敏感。為了避免損壞模組，當風速儀偵測到風速大於臨界點 S 公尺/每秒時，即停止追日系統馬達的運轉，以策安全。然而單純考量風速的因素，將使系統的發電總效能降低，例如，雖然風速超過臨界點 S 公尺/每秒，但是風的方面並非正面吹向太陽光電面板，而是與面板的法向量產生一個 λ 角度如圖二所示。令 $\theta = 90^\circ - \lambda$ ，經過計算其垂直分量 $\sin(\theta)$ 結果小於臨界點 S 公尺/每秒，此時太陽光電面板仍能運轉，以發揮最大的發電效能。所以，其影響的程度決定於風向與太陽光電面板法向量的夾角，其夾角越小，風的垂直分量越大，對於太陽光電面板的危害程度則顯著地增加。反之，其夾角越大，則風的垂直分量越小，對於太陽光電面板的危害程度則顯著地降低。

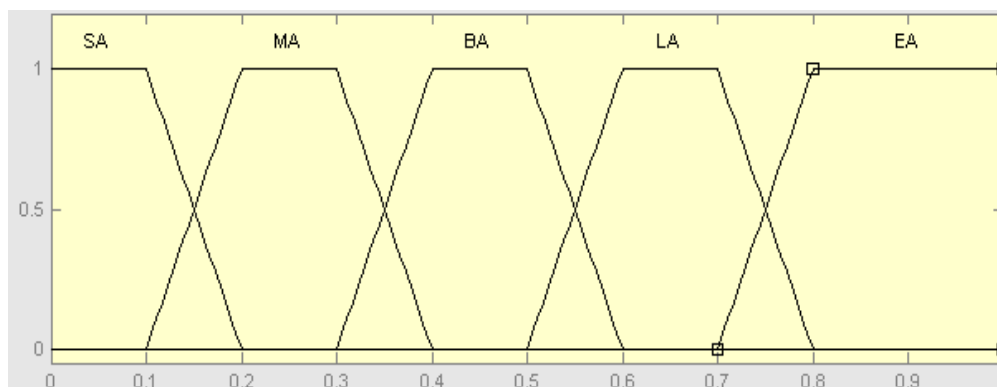


圖二 風向與太陽光電面板法向量的夾角(參考圖一：One MW HCPV Demo System at Lujhu, Taiwan) [19])

關於風向的模糊論域範圍取第一象限，介於0度至90度之間。對於第二至第四象限的角度，則可以併入第一象限來處理。我們以 $\sin \theta$ 垂直分量每0.2的間隔來定義模糊歸屬函數，其範圍為 $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ ，可定義出5段的歸屬函數如表二所示，其模糊歸屬函數如圖三所示。

表二 定義風向的模糊歸屬函數

風向的角度(angle:A)	定義梯形模糊歸屬函數(垂直分量 $\sin \theta$ 值)
SA (small angle) ($0^\circ \sim 12^\circ$)	(0 0 0.1 0.2)
MA (medium angle) ($6^\circ \sim 24^\circ$)	(0.1 0.2 0.3 0.4)
BA (big angle) ($18^\circ \sim 37^\circ$)	(0.3 0.4 0.5 0.6)
LA (large angle) ($30^\circ \sim 54^\circ$)	(0.5 0.6 0.7 0.8)
EA (extra angle) ($45^\circ \sim 90^\circ$)	(0.7 0.8 1 1)

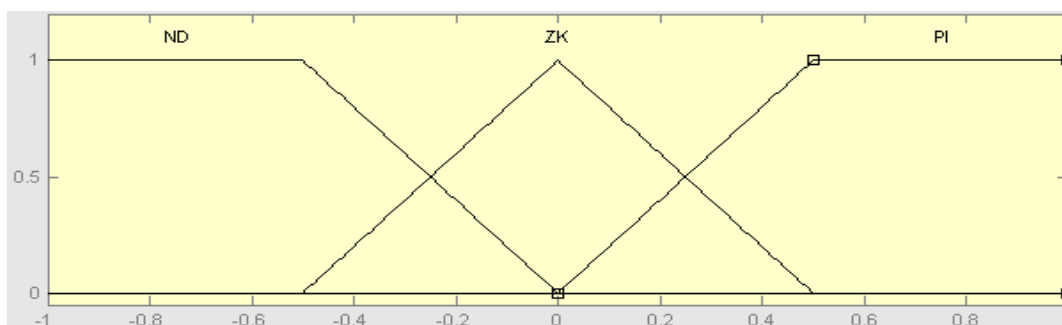


圖三 風向的模糊歸屬函數(橫軸為垂直分量，縱軸為隸屬度)

第三個輸入變數為風速強度的變化率(C)，作為判別風速是增強或是減弱的趨勢，對於在臨界點附近之風速如(S-1)至(S+1)之間的數值，提供一個前置判斷的資料。本研究是以2分鐘平均風速的變化為依據，以正負間隔每秒1公尺為風速增強或是減弱來定義歸屬函數，可定義出3段的歸屬函數如表三所示，其模糊歸屬函數如圖四所示。

表三 定義風速強度變化的模糊歸屬函數

2分鐘平均風速變化(change:C)	定義梯形模糊歸屬函數
ND (decrease) 減弱	(-1 -1 -0.5 0)
ZK (keep) 不變	(-0.5 0 0 0.5)
PI (increase) 增強	(0 0.5 1 1)



圖四 風速強度變化的模糊歸屬函數(橫軸為增減速度，縱軸為隸屬度)

最後，我們要定義輸出的歸屬函數如表四所示，分別是啟動(RUN, $k_1=1$)、保持(KEEP, $k_2=0$)和停止(STOP, $k_3=-1$)，所以我們需要三個尖峰的單態(singleton)函數作為輸出項的歸屬函數如表四所示。

表四 輸出的模糊歸屬函數

控制馬達動作(RS)	定義Takagi-Sugeno模糊輸出歸屬函數
RN (run) 安全(<0)，持續運轉	$k = -1$
KP (keep) 保持現狀	$k = 0$
ST (stop) 危險(≥ 0)，停止放平	$k = 1$

我們要獲得解模糊的輸出結果，在零階Takagi-Sugeno模糊模型通常採用加權平均值(Weighted Average: WA)。例如有n個單態函數，則加權平均值計算如(4)式所示：

$$WA = \frac{\mu(k_1) \times k_1 + \mu(k_2) \times k_2 + \dots + \mu(k_n) \times k_n}{\mu(k_1) + \mu(k_2) + \dots + \mu(k_n)} \quad (4)$$

如果輸出的值 $RS=WA$ 小於0，則讓太陽光電系統正常運轉，如果輸出的值 $RS=WA \geq 0$ ，則停止運轉工作，將太陽光電陣列模板放平等措施，以保護整套系統的安全。

5. 模糊推論演算法

我們已定義三個輸入變數，第一個變數有五種狀態，第二個變數有五種狀態，第三個變數有三種狀態，所以總計有七十五條模糊規則(Rules)如下(節錄)：

- R1. If (speed is MB) and (angle is SA) and (change is ND) then (Run_Stop) is RN
- R2. If (speed is FB) and (angle is SA) and (change is ND) then (Run_Stop) is RN
- ...
- ...
- R25. If (speed is GA) and (angle is EA) and (change is ND) then (Run_Stop) is ST
- ...
- ...
- R42. If (speed is FB) and (angle is LA) and (change is ZK) then (Run_Stop) is KP
- ...
- ...
- R74. If (speed is NB) and (angle is EA) and (change is PI) then (Run_Stop) is ST
- R75. If (speed is GA) and (angle is EA) and (change is PI) then (Run_Stop) is ST

將上述的模糊規則寫成模糊規則表，為了清楚表示關聯性，規則表只顯示二個輸入變數的關連，此將風速變化率 C (正負加速度)的輸入變數固定在某一種狀態時，而顯示風速與角度的關聯表。所以，此列表已將風速變化率隱含納入計算。如表五所示為 $C = ND$ (風速減弱的趨勢)，其他兩個輸入變數的關聯表。如表六所示為 $C = ZK$ (風速不變的趨勢)，其他兩個輸入變數的關聯表。如表七所示為 $C = PI$ (風速增強的趨勢)，其他兩個輸入變數的關聯表。

表五 風速與角度在風速減弱趨勢時之關聯表

$C = ND$	MB	FB	SB	NB	GA
SA	RN	RN	RN	RN	RN
MA	RN	RN	RN	RN	RN
BA	RN	RN	RN	KP	KP
LA	RN	KP	KP	ST	ST
EA	ST	ST	ST	ST	ST

表六 風速與角度在風速不變趨勢時之關聯表

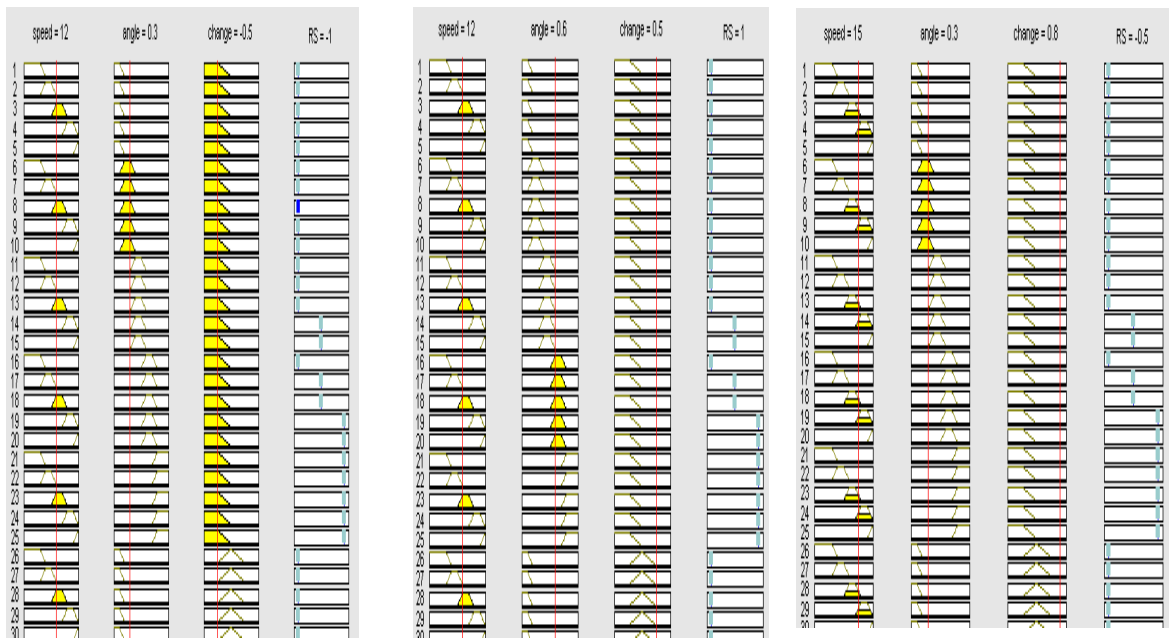
C = ZK	MB	FB	SB	NB	GA
SA	RN	RN	RN	RN	RN
MA	RN	RN	RN	RN	KP
BA	RN	RN	KP	KP	ST
LA	KP	KP	ST	ST	ST
EA	ST	ST	ST	ST	ST

表七 風速與角度在風速增強趨勢時之關聯表

C = PI	MB	FB	SB	NB	GA
SA	RN	RN	RN	RN	RN
MA	RN	RN	RN	KP	ST
BA	RN	KP	KP	ST	ST
LA	KP	ST	ST	ST	ST
EA	ST	ST	ST	ST	ST

6. 模擬結果

使用MATLAB程式模擬，以風速(Speed)、風向角度(Angle)和風速變動率(Change)為輸入的模糊變數，以RS為輸出的判別值。圖五之一為模糊推論的結果，RS小於0，則讓太陽光電系統正常運轉；圖五之二：RS>0，則讓太陽光電系統停止運轉；圖五之三：RS<0，則讓太陽光電系統正常運轉。

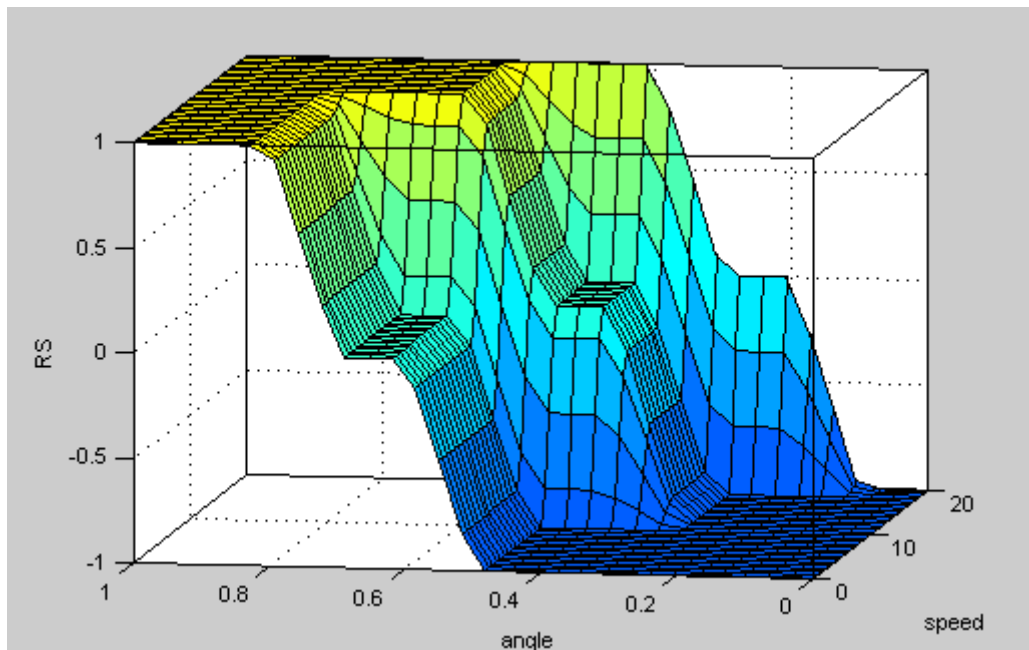


圖五之一：RS<0，正常運轉

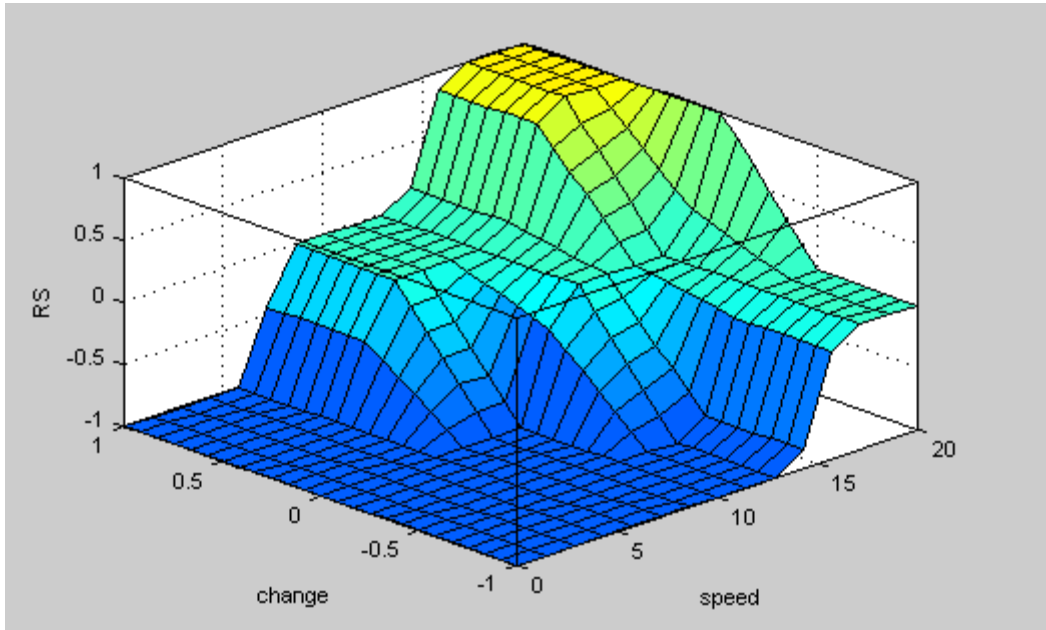
圖五之二：RS>0，停止運轉

圖五之三：RS<0，正常運轉

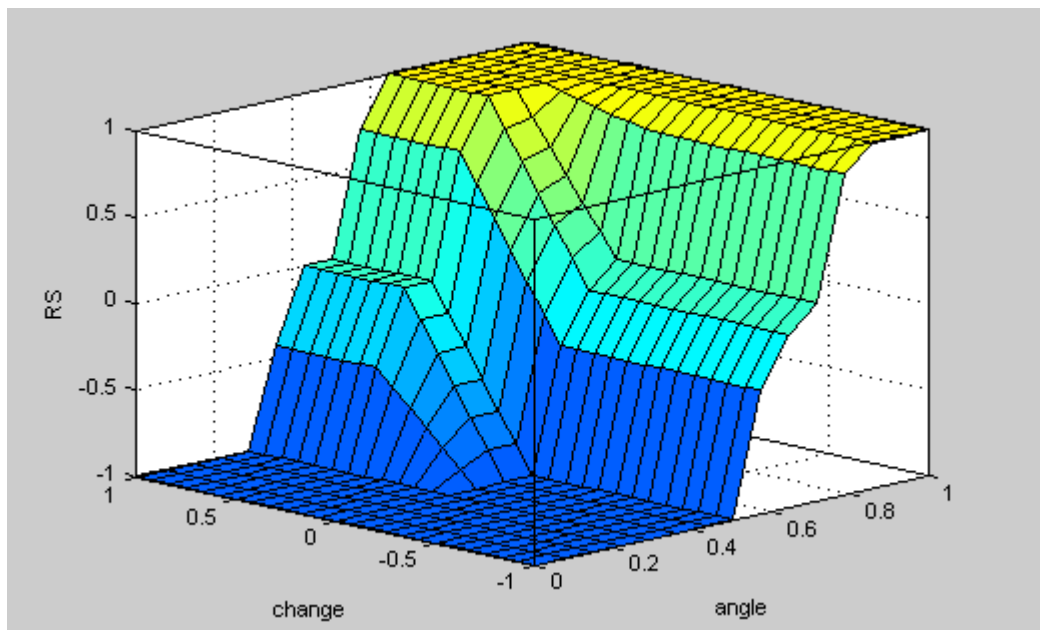
圖六為風速(Speed)對風向角度(Angle)的3D顯示模糊輸出值。圖七為風速(Speed)對風速變動率(Change)的3D顯示模糊輸出值。圖八為風向角度(Angle)對風速變動率(Change)的3D顯示模糊輸出值。圖九為風速(Speed)對風向角度(Angle)的3D輪廓顯示模糊輸出值。從這四個立體顯示圖中，可以觀察得到輸出RS的落點區域，以作為控制的依據。



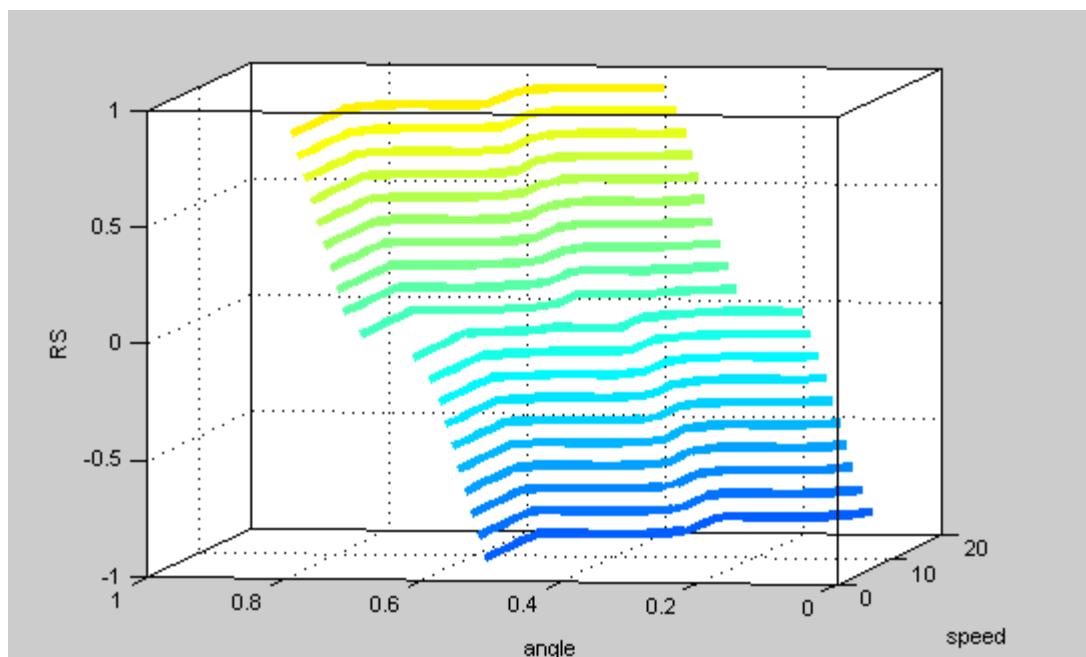
圖六：風速(Speed)對風向角度(Angle)的3D顯示模糊輸出值



圖七：風速(Speed)對風速變動率(Change)的3D顯示模糊輸出值



圖八：風向角度(Angle)對風速變動率(Change)的3D顯示模糊輸出值



圖九：風速(Speed)對風向角度(Angle)的3D輪廓顯示模糊輸出值

7. 結論

太陽能聚光發電(HCPV)模組的陣列面板之體積龐大，受到陣風吹襲的影響力甚鉅。原訂太陽追蹤器在風速大於臨界點 S (公尺/每秒)時，被設定停止啟動運轉，此為了保護太陽追蹤器之馬達的正常功能，避免受損。但是在跨越風速臨界點時將產生開關動作頻繁的問題。此外，單純考量風速的因素而停止運轉，將減少工作時段。例如在陽光普照的夏日裡，由於風速超過臨界點，必須停止HCPV的運作，使得系統的發電總效能降低。

為了解決這些問題，減少過度的機械反應和增加HCPV的工作時段，降低天候影響因素的干擾，我們應用模糊理論的原理，改變傳統明確集合的絕對屬於之概念而擴充至相對屬於的概念，採用Takagi-Sugeno模糊模型(Takagi-Sugeno fuzzy model)，做出模糊的決策。本研究的模糊推論系統有三個輸入變數，分別是風速、風向、和風速的變化率。從圖九的解模糊輸出RS值中可明顯發現，當風向與太陽能聚光發電面板的法向量角度 λ 大於60度時，計算 θ 小於30度，此時縱使風速高達19 m/s，由於垂直分量小於0.5($\sin 300$)，所以解模糊輸出值仍然落在啟動運轉的安全區裡。以此數據控制太陽追蹤器啟動的時機，可防止控制馬達在臨界點上啟動與停止來回變動的不正常現象，達到保護其馬達機組的目標，同時增加HCPV的工作時段，提昇太陽能聚光發電的總效能。

8. 參考文獻

- [1] <http://forum.pvtaiwan.com/>
- [2] http://www.pvtaiwan.com/zh_TW/news/info.html?id=CC1AF60EAC460A8B
- [3] 能源效率坐四望六 HCPV成下一波發展重點，
<http://www.ctimes.com.tw/News/ShowNews.asp?O=201010151740306229>
- [4] Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, pp 338-353.
- [5] Buckley, J.J., 1985, "Fuzzy Hierarchical Analysis", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 17, pp.343-350.
- [6] Cheng, Ching-Hsue, Mon, Don-Lin, 1993, "Fuzzy system reliability analysis by interval of confidence, Fuzzy Sets and Systems 56, 29-35.
- [7] Mon, Don-Lin, Cheng, Ching-Hsue, 1994, "Fuzzy system reliability analysis for components with different membership functions", Fuzzy Sets and Systems

64, 145-157.

- [8] Chen, S. H., Hwang, C. L., 1992, "Fuzzy Multiple Attribute Decision Making", Springer-Verlag, New York.
- [9] Shmilovitz, D., 2005, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 2.
- [10] Aldobhani, Abdulaziz M. S., Robert J., 2008, "Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking", Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, IMECS, 19-21.
- [11] Bahgat, A. B. G., Helwa, N. H., Ahmad, G. E. and Shenawy, E. T. El, 2005, "Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks", Renew. Energy, vol. 30, 1257-1268.
- [12] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu and Katsumi Uezato, 2002, "Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Fuzzy Controller", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, VOL. 38, NO. 3, 969-981.
- [13] Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., 2002 "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", IEEE Power Engineering Winter Meeting.
- [14] Pandey, A., Dasgupta, N., Mukerjee, A. K., 2007, "A Simple Single-Sensor MPPT Solution", IEEE Trans. Power Electron.
- [15] Amenallah Damak, Abdesslem Guesmi and Abdelkader Mami, 2009, "Modeling and fuzzy control of a photovoltaic-assisted watering system", Journal of Engineering and Technology Research Vol.1 (1), 007-013.
- [16] Wang, J. Y., Lin, H. J., Lee, G. L., "Application of Fuzzy Decision in the Tracker Controller of Photovoltaic Arrays", 2010 Innovation Management Research and Application Conference, pp. 1-17. Abstract book on the page 129.
- [17] Mamdani, E. H., 1977, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", IEEE Trans. Comput., vol. C-26, no. 12, pp. 1182-1191.
- [18] Takagi T. and Sugeno M., 1985, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132.
- [19] Lung, I. T., Kuo, C. T., Shin, H. Y., Hong, H. F., Lee, C. D., and Lin, T. T., "Establishment of One MW HCPV System at Taiwan", ISESCO Science and Technology Vision Vol. 6, No. 9, May 2010 pp.50-53.

投稿 Reliability Engineering & System Safety 原文

Controllability Enhancements of HCPV Array under Wind Loads using Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems

Jin-Yinn Wang^{1*}, Horng-Jyh Lin¹, Gwo-Luh Lee¹
¹Vanung University, Taiwan

I-Tao Lung², Chih-Chieh Ma², Shang-Lee Chyou²
²Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, Taiwan

Abstract

The high concentration photovoltaic (HCPV) system has sophisticated solar-tracking mechanism. In order to avoid damage to critical components, each panel of HCPV will be horizontally placed when the wind speed is greater than a predetermined threshold value. Such a consideration seems to be reasonable though, there exist two problems. The first lies in that if the wind speed is constantly changing in the vicinity of threshold value, the motor of solar tracker will be forced to switch between on and off frequently. The reliability of the solar-tracking system will be deteriorated after year-around operations. The second is about serious performance degradation that is, even in the sunny days, as long as the wind speed is greater than the threshold value, the solar tracking device will be triggered to stop working to protect the mechanical parts from being damaged, which leads to loss of power generation.

In this paper we integrated the raw data such: wind speed, wind direction and the change rate of maximum wind speed as multiple input factors at first, and then we use the adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) to solve the problem of the excessive mechanical response to wind loads. Simulations indicated that such design has obtained significant results.

Keywords: High Concentration Photovoltaic; Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems;

1. Introduction

Along with the development of hi-technology, industrial development, energy demand is increasing and the rate of consumption is also more and more rapid. Among the available energy resources, the fossil energy that human being has been most depended not only can be used up, but also causes environmental pollution, carbon dioxide emissions and global warming, all of which makes us to think about the solution. Henceforth, development of new alternative energy sources, especially green energy, is an important issue. In a variety of alternative energy technologies, inexhaustible solar energy chosen to be transferred into electrical energy is the most natural and sustainable thinking. Around the world can be used fairly and no problems of reserves and the monopoly, no doubt that solar energy is the most potential energy; all these features make solar power industry become the most eye-catching Tomorrow's Star.

2. Literatures review

A HCPV system is usually equipped with many concentration modules and the area of the aperture is so large that it might be subjected to wind loads significantly. Thus, wind load is one of the major factors to affect the structural integrity in an HCPV system in addition to the weight of concentration modules. Wu et al. [1] studied the air flow over a two-axis solar tracker with two CPV modules installed, and analyzed the structural deformation of the whole system (CPV modules and tracker). The results showed that the maximum wind load always located on the pedestal of tracker. Cancro et al. [2] analyzed the structural deformation in a CPV system with a two-axis pedestal form through the FEA simulations. The results also showed that the misalignment of solar tracker was mainly caused by the mechanical deformation of the tracking structure due to the structure's weight, the mechanical clearances of the reduction gears, and the wind loads. Peterka et al. [3] measured the mean and peak wind loads on flat rectangular and circular heliostat models. The results showed that wind loads were greater than the predictions for a uniform, low-turbulence flow, due to the presence of turbulence. The force was suddenly increased when the turbulence intensity was greater than 10%. Lerchenmüller [4] paper described that the measured standard deviation for the tracker's elevation oscillation angle is below 0.1° when the solar panel was at a wind speed under 7 m/s. Naeeni et al. [5] performed a two-dimensional numerical simulation about turbulent wind flow around a parabolic through solar collectors in solar power plants. The wind force on the collector structure and mirrors increases sharply when the wind speed increases, especially for large collector angles against wind direction. Rubio et al. [6] presented a hybrid tracking system that consists of a combination of open loop tracking strategies based on solar movement models and closed loop strategies using a dynamic feedback controller. The sun is not constantly tracked with the same accuracy to prevent energy overconsumption by the motors.

Unlike the other researchers approach about the improvement for CPV solar-tracking system, this research proposes a scheme to enhance system performance which is degraded due to the impact of wind loads. This approach is based on both the applications of Fuzzy control theorem and the real wind loads data to train the neural network. During the training process, the related parameters of fuzzy membership functions are constantly adjusted to minimize the errors between network's outputs and preset values. The basic concept of fuzzy theory was first published in *Information and Control* in academic journals [7], 1965 by Professor Zadeh of the University of California, Berkeley. Since then, fuzzy has been used in a wide range of areas, such as fuzzy control system, fuzzy classification (fuzzy clustering), pattern recognition, decision analysis and so on. Fuzzy methods are often used in combination with other algorithms, for example, the combination of fuzzy theory and neural networks, the combination of fuzzy theory and genetic algorithms, and the integration of fuzzy theory and ant algorithms. Fuzzy theory has also been used in solar photovoltaic systems, which are mainly confined to dealing with the issues about maximum power point tracking technology (MPPT)[8-13]. However, it is extremely rare to be applied to the study of the effects of wind on HCPV.

3. The definition of problems

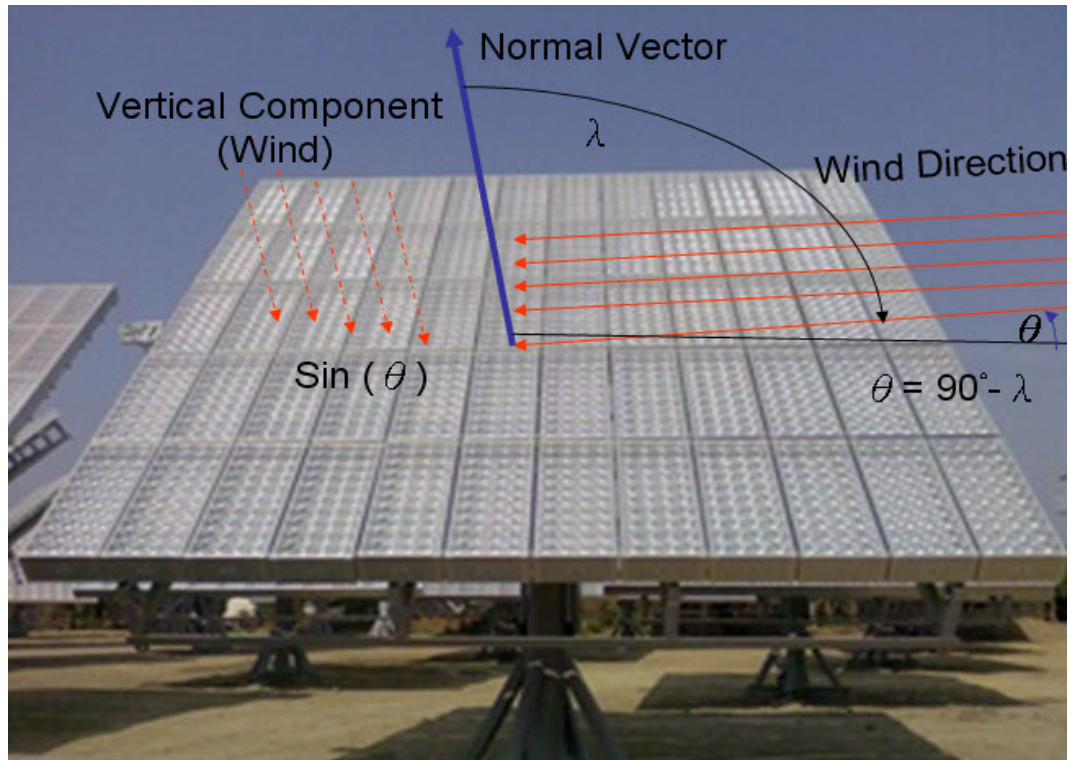
A HCPV system differs from the conventional PV system for it must have an accurate tracking system, causing the maintenance requirements to take more time and cost. In order to keep the motor in solar tracker working normally and to avoid being damaged, the solar tracker is prohibited to follow the sun trajectory by the wind protection mechanism when the wind velocity is greater than a predetermined threshold value called H (meter/second). For simple expression, we call this rule as single factor and crisp decision (or SFCD).

SFCD rule:

If wind speed $s \geq H$, then the solar tracking system is stop and the HCPV panel lay down.

However, such a consideration seems to be reasonable though, there exist two problems. The first lies in that if the wind speed is constantly changing in the vicinity of threshold value, the motor of solar tracker will be forced to switch between on and off frequently. Such a switching operation could damage mechanical parts in solar tracking control system. The second is about serious performance degradation. That is, even in the sunny days, as long as the wind speed is greater than the threshold value, the solar tracking device will be triggered to stop working to protect the mechanical parts from being damaged, which leads to loss of power generation.

In addition to the wind speed, the wind direction is another interesting factor to this paper. For example, although the wind speed exceeds the value of H (m/s), but the direction of wind (called d) blowing is not normal to the solar panel, instead, with an angle λ to the normal vector of the panel shown in Figure 1. Let $\theta = (90^\circ - \lambda)$, through the calculation of the vertical component at $\sin(\theta)$, the result is less than the threshold value of H (m/s), consequently, the solar panels at this time are allowed to operate to maximize power generation efficiency. That is to say, the extent of its impact depends on the wind direction and the angle between the normal vector of the solar panel and the wind direction. When $\theta = 0$ degree, for example, the wind direction is parallel to the array panel, the impact of the vertical component of wind speed on the panel is minimum. When $\theta = 90$ degree, however, the wind direction is perpendicular to array panel, the impact of the vertical component of wind speed on the panel is maximum.



greater

Figure 1. The angle between the wind direction and the normal vector of the solar panel
Quoted from the figure 1 (One MW HCPV Demo System at Lujhu, Taiwan) [14].

The third factor discussed is the change rate (called m) of maximum wind speed, which is used to estimate the tendency of wind velocity being increased (positive) or decreased (negative). It offers pre-judgment information about wind velocity around the threshold value, for example, between $(H-1)$ and $(H+1)$. In this paper, we call the rule using three factors as multiple factors and crisp decision (or MFCD) for simple expression. The output value of the rule will be used as the target value t (or t_x sequence) for equation (7) in the following section of methodology.

MFCD rule:

IF $z = | \text{wind speed } s \times \text{wind direction } d \times \text{vertical component } \sin(\theta) |$, and $z \leq H-1$,

then HCPV panel keep going. The target value t is set to 1 (or ON).

IF $z \geq H+1$, then HCPV panel lay down. The target value t is set to 0 (or OFF).

*IF $H-1 < z < H+1$, and m is **positive**, then HCPV panel lay down. The target value t is set to 0 (or OFF).*

*IF $H-1 < z < H+1$, and m is **negative**, then HCPV panel keep going. The target value t is set to 1 (or ON).*

In response to the variety of wind loads, this paper utilizes adaptive network based fuzzy inference systems (ANFIS)[15] to identify the membership function parameters of single-output, Sugeno [16] type fuzzy inference systems through a hybrid learning algorithm, which is a combination of least-squares and back-propagation gradient descent methods that are used for training these membership function parameters to model a given set of input and output data. For convenience sake of explanation, the approach in this paper is called the

multiple factors and fuzzy decision (MFFD).

MFFD rule:

IF s_1 is B_1 AND d_1 is B_2 AND m_1 is B_3 THEN

$$y_1 = f(s_1; d_1; m_1) = \alpha_1 s_1 + \beta_1 d_1 + \gamma_1 m_1 + \delta_1;$$

$$y_2 = g(s_1; d_1; m_1) = \alpha_2 s_1 + \beta_2 d_1 + \gamma_2 m_1 + \delta_2;$$

The ANFIS strategy is widely used in applications that involve uncertainty or imprecision in the definitions of the variables constituting the system's behavior [17]. Mellit et al. [18-19] proposed a hybrid model for estimating sequences of daily clearness index by using an ANFIS. Chaabene et al. [20] used a neuro-fuzzy dynamic model for forecasting irradiance and ambient temperature. Moghaddamnia et al. [21] used five relevant variables for estimating the daily solar radiation, daily maximum temperature, daily mean temperature, precipitation and wind velocity.

4. The Methodology

An ANFIS structure of three input variables and a single output variable y is illustrated in Figure 2, in which there are five layers with the input variables being wind speed (s), wind direction (d) and maximal changing rate of wind speed (m). The output y is compared with preset value first, the error is fed back to the related layers of ANFIS for parameter adjustment, where preset value is yielded from MFFD rule mentioned in Section 3.

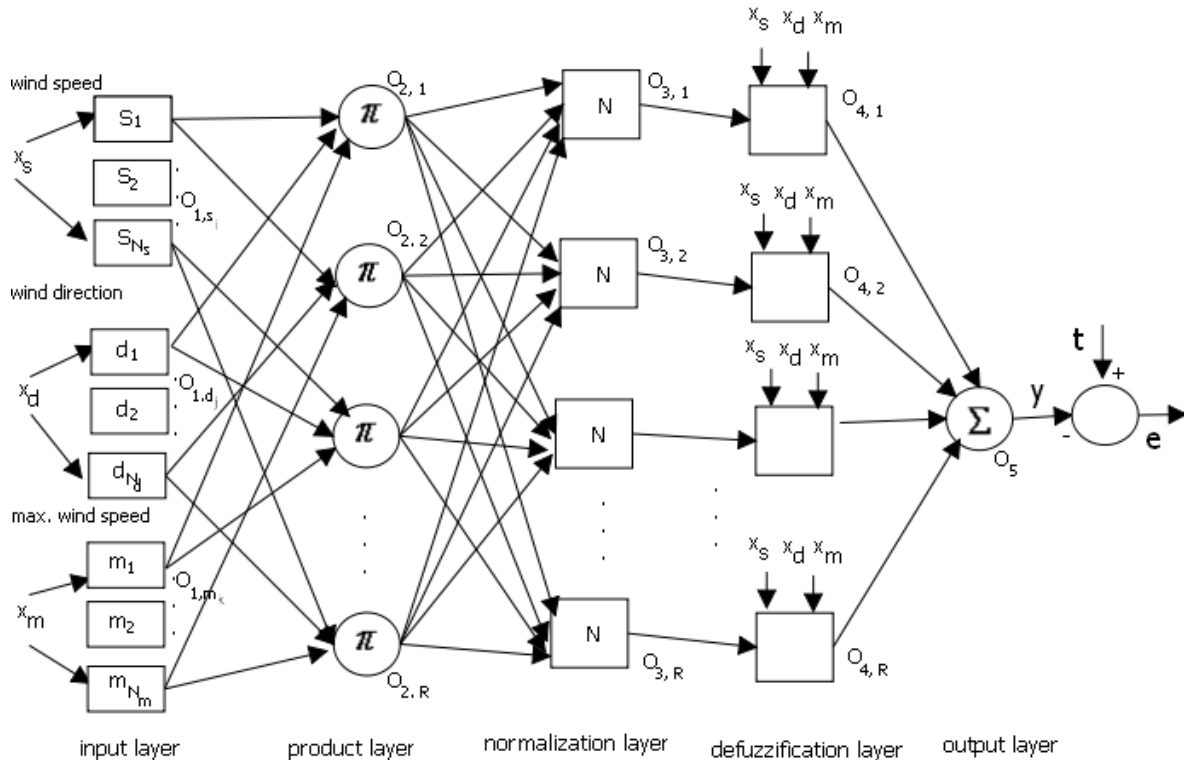


Figure 2. The ANFIS architecture used in this article

The first layer (input layer):

First of all, the input data in this layer is wind speed samples (x_s), wind direction samples (x_d), samples of maximal changing rate of wind speed (x_m). Although the Gaussian membership function and the Bell-shaped membership function seem to be similar, we use both as transfer functions, respectively, and

compare their effects. Equation (1) shows the Gaussian membership function and its outputs $O_{1,s}$ 、 $O_{1,d}$ 、 $O_{1,m}$ and Equation (2) the Bell-shaped membership function and its outputs $O_{1,s}$ 、 $O_{1,d}$ 、 $O_{1,m}$. It can be observed that the fuzzy membership function is composed of nonlinear parameters.

$$\begin{aligned}
 O_{1,s_i} = \mu_i(x_s) &= e^{-\left(\frac{x_s - \theta_{si}}{\sigma_{si}}\right)^2} \quad \text{for } i=1, 2, N_s & O_{1,s_i} = \mu_i(x_s) &= \frac{1}{1 + \left|\frac{x_s - c_{si}}{a_{si}}\right|^{2b_{si}}} \quad \text{for } i=1, 2, N_s \\
 O_{1,d_j} = \mu_j(x_d) &= e^{-\left(\frac{x_d - \theta_{dj}}{\sigma_{dj}}\right)^2} \quad \text{for } j=1, 2, N_d & O_{1,d_j} = \mu_j(x_d) &= \frac{1}{1 + \left|\frac{x_d - c_{dj}}{a_{dj}}\right|^{2b_{dj}}} \quad \text{for } j=1, 2, N_d \\
 O_{1,m_k} = \mu_k(x_m) &= e^{-\left(\frac{x_m - \theta_{mk}}{\sigma_{mk}}\right)^2} \quad \text{for } k=1, 2, N_m & O_{1,m_k} = \mu_k(x_m) &= \frac{1}{1 + \left|\frac{x_m - c_{mk}}{a_{mk}}\right|^{2b_{mk}}} \quad \text{for } k=1, 2, N_m
 \end{aligned}
 \tag{1} \tag{2}$$

The second layer (production layer):

This layer is to match the fuzzy set of input variables after the permutation and combination operation, and then proceed to fuzzy logic evaluation; that is, using T-norm to carry out the fuzzy AND or multiplication computation. This layer is composed of fuzzy membership function with nonlinear parameters, as shown in Equation (3).

$$\begin{aligned}
 O_{2,r} = w_r &= \prod_{i,j,k} \mu_i(x_s) \mu_j(x_d) \mu_k(x_m) \quad \text{for } r=1, \dots, R; R = N_s \times N_d \times N_m \\
 & \quad i = 1, \dots, N_s; j = 1, \dots, N_d; k = 1, \dots, N_m
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

The third layer (normalization layer):

The results of nodes in the nearest previous layers are normalized; that is, the output result of the i -th fuzzy rule divided by the results of all fuzzy rules, which will lead the results to lie between 0 and 1, as shown in Equation (4).

$$O_{3,r} = \overline{w_r} = \frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \quad \text{for } r = 1, \dots, R
 \tag{4}$$

The fourth layer (defuzzification layer):

The normalized result is multiplied with Sugeno fuzzy model as indicated in Equation (5), where the related parameters of first-order Sugeno fuzzy model is adopted.

$$y = o_{4,r} = \overline{w_r} f_r = \overline{w_r} [\alpha_r x_s + \beta_r x_d + \gamma_r x_m + \delta_r] \quad \text{for } r=1, \dots, R
 \tag{5}$$

The fifth layer (output layer):

The last layer is summed up the results of the node outputs of the previous layer, as shown in Equation (6).

$$Y = o_5 = \sum_{r=1}^R o_{4,r} = \sum_{r=1}^R \overline{w_r} f_r = \sum_{r=1}^R \frac{w_r f_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \quad (6)$$

We expect to obtain minimum error for whole training data. Usually, the steepest descent method is used to search E value shown in (7), in which the minimization process is analog to Error Back- Propagation (EBP). Assume t_x is the preset output of the x -th training data; y_x is the estimated value of the x -th training data in ANFIS layer; e_x is the square of error between the preset output and the estimated value of the x -th training data. When the x -th training data is inputted, ANFIS is immediately adjusted weights in small size, as shown in (8).

$$E = \sum e_x, \text{ where } e_x = (1/2)(t_x - y_x)^2 \quad (7)$$

$$\Delta P = -\eta \frac{\partial E}{\partial P} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_x} \frac{\partial y_x}{\partial P} = \eta(t_x - y_x) \frac{\partial y_x}{\partial P} \quad (8)$$

Here P is the set of parameters, η is the learning rate; however, the drawback of the steepest descent method is its slow convergence, long computation time, and being apt to fall into local solution.

We use Hybrid learning algorithm [15] to improve such disadvantages. The parameters are categorized into linear and nonlinear sets, that is, $P = \text{PNL} \cup \text{PL}$, where PL is the parameter of the membership function in the first input layer and is a nonlinear set; the other PL is the parameter of the first order Sugeno model in the 4th layer, which is a linear set. The Least Squares Estimate (LSE) is used to adapt linear parameters and the steepest descent method is to adapt nonlinear parameters, and the combination can be effectively searched the optimum solutions and the convergence rate is significantly improved. First, (6) is rewritten as (9), where A is as (10), the linear parameter PL to be estimated is as (11), and the estimated output value vector is as (12).

$$Y = \underset{r=1}{\overset{R}{\overset{\circ}{a}}} \overline{w_r} f_r = AP_L \quad (9)$$

$$A = \begin{bmatrix} \overline{x_{s1 1}} \overline{w_{d1 1}} \overline{x_{m1 1}} \overline{w_{1 1}} & \overline{x_{s1 2}} \overline{w_{d1 2}} \overline{x_{m1 2}} \overline{w_{2 2}} & \dots & \overline{x_{s1 R}} \overline{w_{d1 R}} \overline{x_{m1 R}} \overline{w_{R R}} \\ \overline{x_{s2 1}} \overline{w_{d2 1}} \overline{x_{m2 1}} \overline{w_{1 1}} & \overline{x_{s2 2}} \overline{w_{d2 2}} \overline{x_{m2 2}} \overline{w_{2 2}} & \dots & \overline{x_{s2 R}} \overline{w_{d2 R}} \overline{x_{m2 R}} \overline{w_{R R}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{x_{sk 1}} \overline{w_{dk 1}} \overline{x_{nk 1}} \overline{w_{1 1}} & \overline{x_{sk 2}} \overline{w_{dk 2}} \overline{x_{nk 2}} \overline{w_{2 2}} & \dots & \overline{x_{sk R}} \overline{w_{dk R}} \overline{x_{nk R}} \overline{w_{R R}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_L = [a_1 \ b_1 \ g_1 \ d_1 \ a_2 \ b_2 \ g_2 \ d_2 \ \dots \ a_R \ b_R \ g_R \ d_R]^T \quad (11)$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_X]^T \quad (12)$$

The minimum of (9) using LSE is as (13), therefore PL the optimal solution

is (14). Here AT is the transpose of A, (ATA)-1AT is the pseudo-inverse of A.

$$\|APL - Y\|^2 \quad (13)$$

$$PL = (ATA)^{-1}ATY \quad (14)$$

After the solution of PL is obtained, the values of the parameter set are locked and the error is sent back. The steepest descent method is used to solved PNL as (15) whose parameter as (16).

$$\Delta P_{NL} = -\eta \frac{\partial E}{\partial P_{NL}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_x} \frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} = \eta (t_x - y_x) \frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} \quad (15)$$

$$P_{NL} = \{ [P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sNs}], [P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dNd}], [P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mNm}] \} \quad (16)$$

For Gaussian membership function, whose parameters $\Psi_i = (\theta_{si}, \sigma_{si})$, $i = 1, 2, \dots, N_s$; $\Psi_j = (\theta_{dj}, \sigma_{dj})$, $j = 1, 2, \dots, N_d$; $\Psi_k = (\theta_{mk}, \sigma_{mk})$, $k = 1, 2, \dots, N_m$; for Bell-shaped membership function, whose parameters $\Psi_i = (a_{si}, b_{si}, c_{si})$, $i = 1, 2, \dots, N_s$; $\Psi_j = (a_{dj}, b_{dj}, c_{dj})$, $j = 1, 2, \dots, N_d$; $\Psi_k = (a_{mk}, b_{mk}, c_{mk})$, $k = 1, 2, \dots, N_m$.

To further solve nonlinear parameters, substituting (6) into (15) to obtain (17) and (18).

$$\frac{\partial y_x}{\partial P_{NL}} = \sum_{r=1}^R f_r \times \frac{\partial \bar{w}_r}{\partial P_{NL}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \bar{w}_r}{\partial P_{NL}} = \frac{\partial w_r}{\partial P_{NL}} \times \frac{1}{\sum_{r=1}^R w_r} - \frac{w_r}{[\sum_{r=1}^R w_r]^2} \times \left(\frac{\partial \sum_{r=1}^R w_r}{\partial P_{NL}} \right) \quad (18)$$

For convenience sake of explanation, the partial differential results of Ψ_1 for set of PNL are show in (19) and (20), respectively. The remaining can be obtained in the similar way.

$$\frac{\partial w_r}{\partial P_{NL}} = \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial P_{s1}} \times \mu_j(x_d) \times \mu_k(x_m) \text{ for } j = 1, 2, \dots, N_d; k = 1, 2, \dots, N_m \quad (19)$$

$$\frac{\partial \sum_{r=1}^R w_r}{\partial P_{NL}} = \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial P_{s1}} \times \left[\sum_{j=1}^{N_d} \sum_{k=1}^{N_m} \mu_{dj}(x_d) \times \mu_{mj}(x_m) \right] \quad (20)$$

Finally, for Gaussian membership function, $\Psi_1 = (\theta_{s1}, \sigma_{s1})$, the corresponding partial differential result of parameter as in (21).

$$\frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial \theta_{s1}} = \frac{2(x_s - \theta_{s1})}{\sigma_{s1}^2}; \quad \frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial \sigma_{s1}} = \frac{2(x_s - \theta_{s1})^2}{\sigma_{s1}^3} \quad (21)$$

For Bell-shaped membership function, $\Psi_1 = (a_{s1}, b_{s1}, c_{s1})$ or simplified as $\Psi_1 = (a, b, c)$, the corresponding partial differential result of parameter as in (22)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial a} &= 2a^{-2b-1}b(x_s - c)^{2b} \left(1 + \left|\frac{x_s - c}{a}\right|^{2b}\right)^{-2} \\
\frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial b} &= -2 \left|\frac{x_s - c}{a}\right|^{2b} \cdot \ln \left|\frac{x_s - c}{a}\right| \left(1 + \left|\frac{x_s - c}{a}\right|^{2b}\right)^{-2} \\
\frac{\partial \mu_1(x_s)}{\partial c} &= 2a^{-2b}b(x_s - c)^{2b-1} \left(1 + \left|\frac{x_s - c}{a}\right|^{2b}\right)^{-2}
\end{aligned} \tag{22}$$

5. Simulations and Results

HCPV technologies have been studied by Institute of Nuclear Energy Research (INER) of Taiwan since 2003, including technologies of III-V solar cell, concentration solar module, solar tracker, central control and monitoring system, and solar module qualification, etc. The data in this research is from the measured results of anemometers of the HCPV system built in Luchu, Kaohsiung. It is 50,000 records (including wind speed, wind direction, and maximum changing rate of wind speed) from 2011/05 to 2011/07 and used for ANFIS training purpose, as shown in Figure 3. Other 50,000 records were obtained from 2011/08 to 2011/09 for ANFIS testing purpose, as shown in Figure 4.

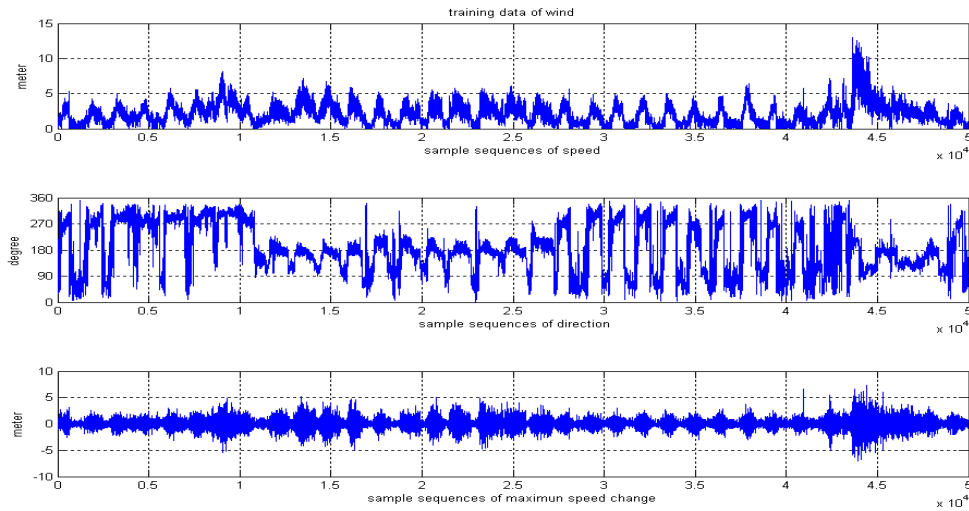


Figure 3. Training data from wind loads for ANFIS

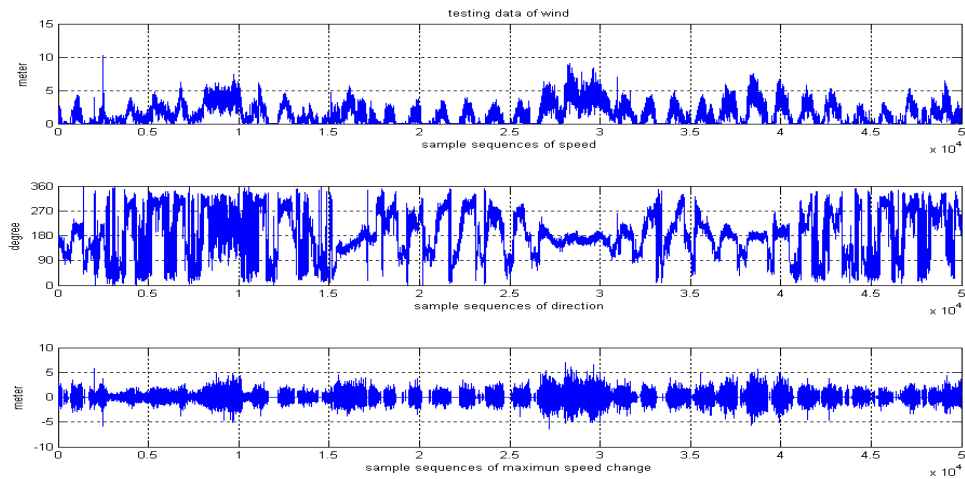


Figure 4. Testing data from wind loads for ANFIS

The Gaussian membership function is presumed in the input layer as shown in Figure 5 and is shown in Figure 6 after iterative training and parameter adjustment. By comparing both figures, the significant difference can be observed. Besides, For presumed Bell-shaped membership function is shown in Figure 7, and the similar procedure is done as for Gaussian membership function with result in Figure 8. The result is also similar to those of the Gaussian membership function.

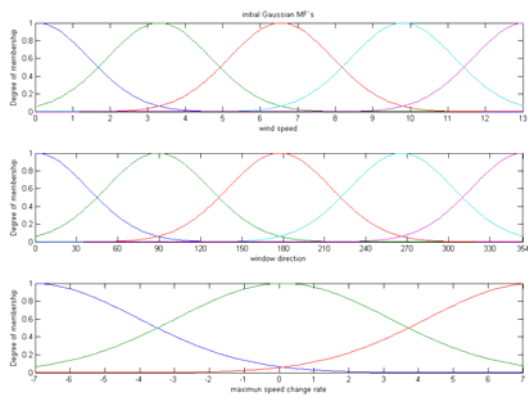


Figure 5. Initial Gaussian MF's

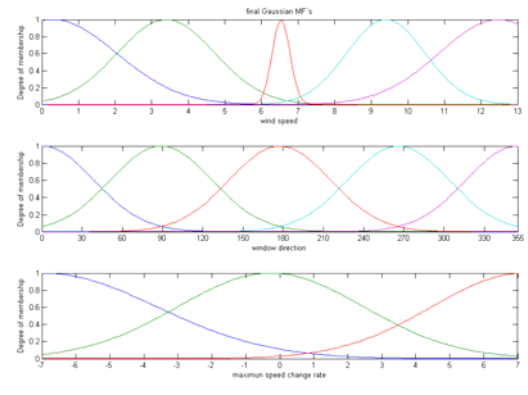


Figure 6. Final Gaussian MF's

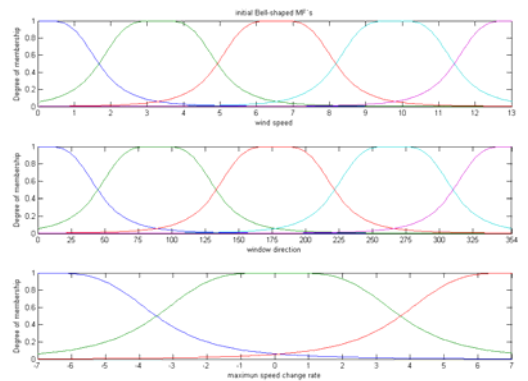


Figure 7. Initial Bell-shaped MF's

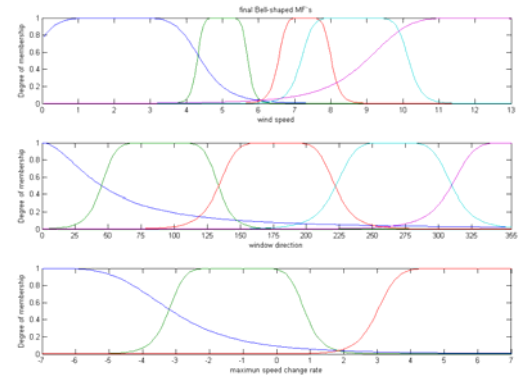


Figure 8. Final Bell-shaped MF's

The training process stops whenever the designated epoch number is reached or the training error goal is achieved. A testing data set is also used to prevent overfitting of the training data set. The overfitting can be detected when the testing error (root mean squared errors, RMSE) starts increasing while the training error (RMSE) is still decreasing. The training and testing error curves using Gaussian MF's or Bell-shaped MF's during 300 epochs are shown in figure 9 and figure 10, respectively.

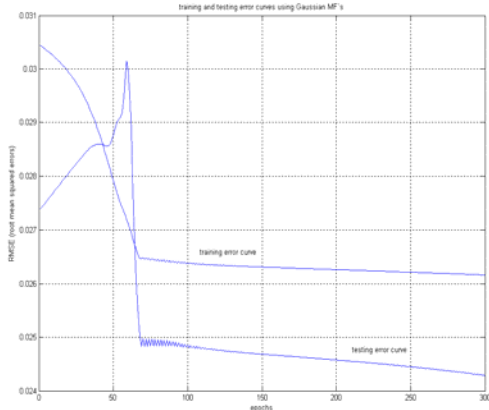


Figure 9. training and testing error curves using Gaussian MF's during 300 epochs

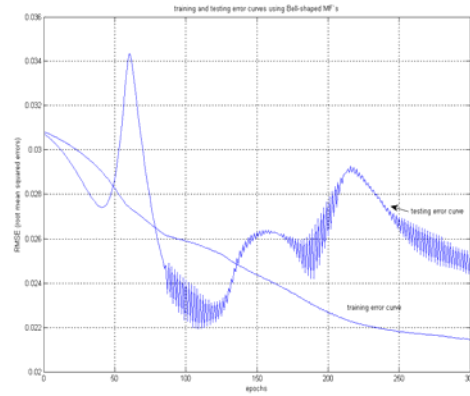


Figure 10. training and testing error curves using Bell-shaped MF's during 300 epochs

A comparison of three methods for the performance evaluation is made as shown in Table 1.

Methods	SFCD (original)	MFFD (Gaussian)	MFFD (Bell-shaped)
HCPV state			
<i>No. of training data</i>	50,000	50,000	50,000
No. of ON-state	48,356	49,638	49,635
No. of OFF-state	<u>1,644</u>	<u>362</u>	<u>365</u>
improvements	-	77.98%	77.80%
<i>No. of testing data</i>	50,000	50,000	50,000
No. of ON-state	48,738	49,987	49,981
No. of OFF-state	<u>1,262</u>	<u>13</u>	<u>19</u>
improvements	-	98.97%	98.50%

Table 1 Comparisons and Performance Evaluations

It can be obtained from this Table when the HCPV system using SFCD have 1644 (training data) and 1262 (testing data) times in OFF-state, respectively; HCPV system using MFFD (Gaussian) have 362 and 13 times in OFF-state, respectively. Comparing with using SFCD, MFFD offers 77.98% and 98.97% performance improvements. The third method is MFFD (Bell-shaped) with 365 and 19 time in OFF-state; it offers 77.80% and 98.50% performance improvements Comparing with using SFCD.

6. Conclusions

The proposed approach in this paper is to improve stability of HCPV solar-tracking, promote the capability of security, control and system adaptation for environment, and increase time performance of power generation.

In the paper, multiple input factors and fuzzy decision is used instead of single input factor which is wind speed only and used crisp decision. From the real data and simulated results indicated that this approach can be greatly improved (over 75% in this research), especially in bigger wind speed. On the other hand, if the wind direction is stable and is nearly parallel to the panel array, the improvement extent is further increased (over 98% in this research).

It is observed in this research, the usage of Gaussian member function and Bell-shaped membership function does not exist significant difference in performance. It is worthy to mention that the performance of testing data is better than that of training data used in this research, which is due to the wind speed in testing data is much weaker than that of training data and when the wind speed is around the threshold value, the wind direction and HCPV panel is in parallel state at most times. In the case of big wind gust and wind direction being constantly changing, it is, however, more practical to place the array panels horizontally.

7. References

- [1] J. C. Wu, K. H. Lin, and C. K. Lin, "Wind Load Analysis of A Solar Tracker For Concentrator Photovoltaics", 6th international conference on concentrating photovoltaic systems, 2010, Volume 1277, pp. 145-148.
- [2] C. Cancro, G. Graditi, G. Leanza, F. Pascarella, A. Sarno, and D. Mancini, "Field Testing of the PhoCUS Solar Tracker by Means of a Novel Optoelectronic Device," in Proceeding of the 4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, Spain, 2007.
- [3] J. A. Peterka, Z. Tan, J. E. Cermak, and B. Bienkiewicz, "Mean and Peak Wind Loads on Heliostats," Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 111, 1989, pp. 158-164.
- [4] H. Lerchenmüller, A. Hakenjos, I. Heile, B. Burger, O. Stalter, "From FLATCON® Pilot Systems to the first Power Plant", 2007 International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen, Spain, pp 1-4.
- [5] N Naeeni and M. Yaghoubi, "Analysis of Wind Flow Around a Parabolic collector (1) Fluid Flow," Renewable Energy, Vol. 32, 2007, pp. 1898-1916.
- [6] F. R. Rubio, M. G. Ortega, F. Gordillo, and M. Lopez-Martinez, "Application of New Control Strategy for Sun Tracking," Energy Conversion and Management, Vol. 48, 2007, pp. 2174-2184.
- [7] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, vol. 8, 1965, pp338-353.
- [8] D. Shmilovitz, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 2., 2005.
- [9] Abdulaziz M. S. Aldobhani, R. John, "Maximum Power Point Tracking of PV System Using ANFIS Prediction and Fuzzy Logic Tracking", 2008 Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, IMECS, pp.19-21.
- [10] A. B. G. Bahgat, N. H. Helwa, G. E. Ahmad, and E. T. El

- Shenawy, "Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks", *Renew. Energy*, vol. 30, 2005, 1257–1268.
- [11] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu and Katsumi Uezato, "Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Fuzzy Controller", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, VOL. 38, NO. 3, 2002, pp.969-981.
- [12] N. Patcharaprakiti, S. Premrudeepreechacharn., "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", *IEEE Power Engineering Winter Meeting*. 2002, Vol. 1, pp.372 – 377.
- [13] A. Pandey, N. Dasgupta, A. K. Mukerjee, "A Simple Single-Sensor MPPT Solution", *IEEE Trans. Power Electron*, Volume 22, Issue 2, 2007, pp. 698 - 700.
- [14] I-Tao Lung, Cherng-Tsong Kuo, Hwa-Yuh Shin, Hwen-Fen Hong, Cheng-Dar Lee, and Tsung-Te Lin, "Establishment of One MW HCPV System at Taiwan", *ISESCO Science and Technology Vision* Vol. 6, No. 9, May 2010 pp.50-53.
- [15] J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Neuro-based Fuzzy Inference Systems," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685, May 1993.
- [16] T. TAKAGI and M. SUGENO, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control," *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 15, no. 1, pp. 116 - 132, 1985.
- [17] Soteris Kalogirou and Arzu Sencan, "Solar Collectors and Panels, Theory and Applications", *Artificial Intelligence Techniques in Solar Energy Applications*, ISBN 978-953-307-142-8, Edited by: Reccab Manyala, Publisher: InTech, October 2010.
- [18] Mellit, A., Kalogirou, S.A., Shaari, S., Salhi, H. & Hadj Arab, A. (2008). Methodology for predicting sequences of mean monthly clearness index and daily solar radiation data in remote areas: Application for sizing a stand-alone PV system. *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1570-1590.
- [19] Mellit, A. & Pavan A.M. (2010). A 24-h forecast of solar irradiance using artificial neural network: Application for performance prediction of a grid-connected PV plant at Trieste, Italy. *Solar Energy*, Vol. 84, No. 5, pp. 807-821.
- [20] Chaabene, M. & Ammar, M.B. (2008). Neuro-fuzzy dynamic model with Kalman filter to forecast irradiance and temperature for solar energy systems. *Renewable Energy*, Vol. 33, pp. 1435–1443.
- [21] Moghaddamnia, A., Remesan, R., Kashani, M.H., Mohammadi, M., Han, D. & Piri, J. (2009). Comparison of LLR, MLP, Elman, NNARX and ANFIS Models-with a case study in solar radiation estimation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 71, pp. 975–982.